

# **UNIVERSIDAD DE CUENCA**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

### **EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA AUTOCOMPACTANTES REFORZADOS CON FIBRAS METÁLICAS NORMALIZADAS Y FIBRAS METÁLICAS NO NORMALIZADAS.**

#### **TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

#### **AUTORES:**

DIEGO GERMÁN GUAMÁN MATUTE  
C.I: 0105183172  
JULIO CESAR JURADO MOGROVEJO  
C.I: 0105137665

#### **DIRECTOR:**

INGENIERO JORGE MOSCOSO FERNÁNDEZ SALVADOR M.Sc.  
C.I: 0104429733

CUENCA-ECUADOR

OCTUBRE- 2016



## RESUMEN

Varias estructuras o partes de estas están sometidos a esfuerzos altos, estos esfuerzos conllevan que los ingenieros estructurales recomienden secciones de gran tamaño y grandes cantidades de refuerzos de acero en los elementos de hormigón generando congestión. El hormigón estudiado tiene propiedades autocompactantes y de alta resistencia. Los estudios a realizar con los nuevos materiales de construcción requieren procesos experimentales que ocupan grandes recursos, por tanto, es conveniente desarrollar una metodología que minimice el uso de recursos. El objetivo de esta investigación es identificar si la inclusión de fibras metálicas normalizadas y no normalizadas afecta las propiedades mecánicas del hormigón estudiado. El método utilizado se basa en determinar las cantidades de fibra a incluir en el hormigón para cada tratamiento, así como las repeticiones del mismo, en base a esta distribución se fabrican los especímenes y se ensayan para la obtención de la resistencia a compresión, asentamiento, velocidad de onda, módulo de elasticidad y relación de Poisson. Los datos son procesados mediante métodos estadísticos que indican que tratamientos son significativamente diferentes y que efectos son considerados relevantes. Mediante regresión lineal múltiple se obtienen ecuaciones matemáticas, que expresadas mediante gráficos tridimensionales representan el fenómeno estudiado. Se observó que la inclusión de una cantidad hasta  $20 \text{ kg/m}^3$  de fibra normalizada no influye en el asentamiento siempre que no se incluya otro tipo de fibra, la inclusión de fibras en cualquier nivel del espacio experimental aumenta la resistencia a la compresión, se recomienda continuar la investigación conforme la metodología de superficie de respuesta.

**Palabras clave:** propiedades mecánicas del hormigón, diseño de experimentos, materiales de construcción, hormigón con inclusión de fibras metálicas.



## ABSTRACT

Several structures, or parts of them are subjected to high stresses, these makes structural engineers recommend large sections and large amounts of steel reinforcements generating congestion. The concrete studied has self-compacting and high strength properties. The studies to be carried out with new building materials require experimental processes that take a lot of resources, therefore, it is desirable to develop a methodology that minimizes the use of thereof. The objective of this research is to identify whether the inclusion of normalized standard and non-standard metal fibers affects the mechanical properties of concrete studied. The method used is based on determining the amounts of fiber to be included in concrete for each treatment, as well as the repetitions of it. Based on this distribution specimen were manufactured and tested for obtaining compressive strength, slump, wave velocity, elastic modulus and Poisson's ratio. The obtained data was processed by statistical methods that indicate which treatments were significantly different and what effects were considered relevant. Mathematical equations were obtained by multiple linear regression, and expressed by three-dimensional graphics that represent the phenomenon under study. The inclusion of normalized fibers of up to  $20\text{kg/m}^3$  does not influence the settlement whenever another type of fiber is not included, including fibers at any level of the experimental space increases the resistance compression, it is recommended to continue the investigation under the response surface methodology.

**Key words:** mechanical properties of concrete, design of experiments, building materials, concrete with metal fiber inclusion.



---

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	15
1.2 OBJETIVOS .....	16
1.2.1 Objetivo general.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	17
1.4 HIPÓTESIS .....	18
1.5 METODOLOGÍA .....	18
<b>CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....</b>	<b>20</b>
2.1 SELECCIÓN DE MATERIALES.....	20
2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ÁRIDO GRUESO Y FINO .....	20
2.2.1 Granulometría .....	20
2.2.2 Humedad .....	23
2.2.3 Absorción.....	24
2.2.3 Peso Específico .....	25
2.2.4 Forma .....	27
2.3 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y FÍSICAS DE LAS FIBRAS METÁLICAS NORMALIZADAS Y NO NORMALIZADAS.....	29
2.3.1 Tamaño y Forma.....	29
2.3.2 Peso específico.....	30
<b>CAPÍTULO 3: ELABORACIÓN Y ENSAYO DE HORMIGONES .....</b>	<b>31</b>
3.1 DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS .....	31
3.1.1 Principios básicos del diseño estadístico de experimentos .....	31
3.1.2 Fundamentos del diseño estadístico de experimentos .....	35
3.1.3 Diseño factorial $3^k$ .....	43
3.2 PRODUCCIÓN DE HORMIGONES.....	45
3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN .....	49
3.3.1 Asentamiento.....	49
3.3.2 Velocidad de onda .....	51
3.3.3 Compresión simple .....	53
3.3.4 Módulo de elasticidad y Relación de Poisson .....	54



---

3.3.5 Módulo de Ruptura .....	56
<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....</b>	<b>59</b>
4.1 ANÁLISIS DE VARIANZA SIMPLE .....	59
4.1.1 Asentamiento (s) .....	62
4.1.2 Velocidad de onda (m/s) .....	64
4.1.3 Compresión simple (kg/cm <sup>2</sup> ) .....	66
4.1.4 Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> ) .....	68
4.1.5 Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> ) .....	69
4.1.6 Relación de Poisson .....	70
4.2 ANOVA MULTIFACTORIAL, EFECTOS PRINCIPALES Y DE INTERACCIÓN. ....	72
4.2.1 Asentamiento (s) .....	75
4.2.2 Velocidad de onda (m/s) .....	76
4.2.3 Compresión simple (kg/cm <sup>2</sup> ) .....	76
4.2.4 Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> ) .....	77
4.2.5 Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> ) .....	78
4.2.6 Relación de Poisson .....	78
4.3 MODELOS DE REGRESIÓN Y GRÁFICOS DE SUPERFICIE .....	79
4.3.1 Asentamiento .....	82
4.3.2 Compresión simple .....	83
<b>CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>84</b>
5.1 ASENTAMIENTO .....	84
5.2 VELOCIDAD DE ONDA .....	85
5.3 COMPRESIÓN SIMPLE .....	85
5.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	86
5.5 MÓDULO DE RUPTURA .....	87
5.6 RELACIÓN DE POISSON .....	88
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>91</b>



## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Granulometría árido grueso. ....	21
<b>Figura 2.</b> Granulometría árido fino.....	22
<b>Figura 3.</b> Granulometría árido fino combinado.....	23
<b>Figura 4.</b> Relación L/A fibra no normalizada. ....	29
<b>Figura 5.</b> Análisis microscópico fibra no normalizada. ....	30
<b>Figura 6.</b> Imagen compuesta obtenida del análisis microscópico de la fibra no normalizada. ..	30
<b>Figura 7.</b> Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento (Gutiérrez Pulido, 2008). ....	31
<b>Figura 8.</b> Dimensiones de los especímenes fabricados.....	34
<b>Figura 9.</b> Distribución de las combinaciones de niveles. ....	34
<b>Figura 10.</b> Curva de operación (Montgomery, 2004). ....	35
<b>Figura 11.</b> Ensacado y almacenamiento de los áridos. ....	38
<b>Figura 12.</b> Mina de árido fino.....	38
<b>Figura 13.</b> Muestra de árido fino.....	38
<b>Figura 14.</b> Mina de árido grueso.....	39
<b>Figura 15.</b> Muestra de árido grueso. ....	40
<b>Figura 16.</b> Muestra del cemento utilizado. ....	40
<b>Figura 17.</b> Aditivo Sika Viscocrete 2100.....	41
<b>Figura 18.</b> Sika Fiber CHO 65/35. ....	41
<b>Figura 19.</b> Muestra de fibra no normalizada.....	42
<b>Figura 20.</b> Ejemplos de efecto lineal y con curvatura (Gutiérrez Pulido, 2008). ....	44
<b>Figura 21.</b> Resistencia a compresión de las replicas de la mezcla base.....	46
<b>Figura 22.</b> Mezclado inicial. ....	48
<b>Figura 23.</b> Llenado de probetas.....	48
<b>Figura 24.</b> Piscinas de curado. ....	49
<b>Figura 25.</b> Ensayo de asentamiento.....	50
<b>Figura 26.</b> Ensayo de ultrasonido.....	52
<b>Figura 27.</b> Ensayo de compresión simple. ....	53
<b>Figura 28.</b> Distribución de valores según el laboratorio. ....	55
<b>Figura 29.</b> Ensayo para módulo de elasticidad y relación de Poisson.....	56
<b>Figura 30.</b> Compresómetro laboratorio LABSCON. ....	56
<b>Figura 31.</b> Ensayo para determinar el módulo de ruptura.....	57
<b>Figura 32.</b> Tipo de falla tratamiento 20N20L. ....	58
<b>Figura 33.</b> Tipo de falla tratamiento 40N40L. ....	58
<b>Figura 34.</b> Representación de los efectos de los tratamientos ....	60
<b>Figura 35.</b> Gráfico de Caja y Bigotes para el ensayo de asentamiento.....	63
<b>Figura 36.</b> Gráfico de Medias y 95.0% de Fisher LSD para el ensayo de asentamiento. ....	63
<b>Figura 37.</b> Gráfico de cajas y Bigotes para la velocidad de onda. ....	65
<b>Figura 38.</b> Gráfico de Medias y 95.0% de Fisher LSD para velocidad de onda. ....	65
<b>Figura 39.</b> Gráfico de caja y bigotes para ensayo de compresión simple.....	67
<b>Figura 40.</b> Gráfico de Medias y 95.0% de Fisher LSD para el ensayo de compresión simple. .	67
<b>Figura 41.</b> Gráfico de caja y bigotes para módulo de elasticidad. ....	69
<b>Figura 42.</b> Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para módulo de elasticidad.....	69
<b>Figura 43.</b> Gráfico de caja y bigotes para módulo de ruptura. ....	70
<b>Figura 44.</b> Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para módulo de ruptura. ....	70
<b>Figura 45.</b> Gráfico de caja y bigotes para la relación de Poisson. ....	71
<b>Figura 46.</b> Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para la relación de Poisson. ....	71



---

<b>Figura 47.</b> Gráfico de medias. ....	73
<b>Figura 48.</b> Efectos de interacción. ....	74
<b>Figura 49.</b> Efectos de interacción con medias. ....	74
<b>Figura 50.</b> Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para el Factor A dentro del ensayo de asentamiento. ....	75
<b>Figura 51.</b> Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para el Factor A dentro del ensayo de compresión simple. ....	77
<b>Figura 52.</b> Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para el Factor B dentro del ensayo de compresión simple. ....	77
<b>Figura 53.</b> Gráfico de superficie del modelo de regresión para el ensayo de asentamiento (X: fibra normalizada en kg/m <sup>3</sup> , Y: fibra no normalizada en kg/m <sup>3</sup> ). ....	82
<b>Figura 54.</b> Gráfico de superficie del modelo de regresión para el ensayo de compresión simple. (X: fibra normalizada en kg/m <sup>3</sup> , Y: fibra no normalizada en kg/m <sup>3</sup> ). ....	83



## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Porcentaje de humedad de los áridos. ....	24
<b>Tabla 2.</b> Porcentaje de absorción de los áridos. ....	25
<b>Tabla 3.</b> Densidad relativa de los áridos. ....	27
<b>Tabla 4.</b> Tabla de la norma NTE INEN 0872, 2011 para la clasificación de los áridos. ....	28
<b>Tabla 5.</b> Clasificación de los áridos. ....	28
<b>Tabla 6.</b> Peso específico de las fibras. ....	30
<b>Tabla 7.</b> Niveles y tratamientos. ....	34
<b>Tabla 8.</b> Calculo del número de réplicas. ....	36
<b>Tabla 9.</b> Aleatorización de las repeticiones. ....	37
<b>Tabla 10.</b> Nomenclatura de los tratamientos. ....	45
<b>Tabla 11.</b> Dosificación de la mezcla base. ....	45
<b>Tabla 12.</b> Resistencia a compresión de las réplicas de la mezcla base. ....	46
<b>Tabla 13.</b> Dosificación de los diferentes tratamientos del experimento. ....	47
<b>Tabla 14.</b> Densidad de hormigón endurecido. ....	49
<b>Tabla 15.</b> Resultados del ensayo de asentamiento. ....	51
<b>Tabla 16.</b> Resultados de velocidad de onda y módulo de elasticidad a partir de la velocidad de onda. ....	52
<b>Tabla 17.</b> Resultados del ensayo de compresión simple. ....	53
<b>Tabla 18.</b> Resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson. ....	55
<b>Tabla 19.</b> Validación de datos. ....	55
<b>Tabla 20.</b> Resultados de módulo de elasticidad corregidos. ....	56
<b>Tabla 21.</b> Resultados del módulo de ruptura. ....	57
<b>Tabla 22.</b> ANOVA simple del ensayo de asentamiento. ....	62
<b>Tabla 23.</b> Prueba de múltiples rangos en el ensayo de asentamiento. ....	64
<b>Tabla 24.</b> ANOVA simple de la velocidad de onda. ....	64
<b>Tabla 25.</b> ANOVA simple del módulo de elasticidad obtenido mediante la velocidad de onda. ....	65
<b>Tabla 26.</b> ANOVA simple del ensayo de compresión simple. ....	66
<b>Tabla 27.</b> Prueba de múltiples rangos del ensayo de compresión simple. ....	68
<b>Tabla 28.</b> ANOVA simple del módulo de elasticidad. ....	68
<b>Tabla 29.</b> ANOVA simple del módulo de ruptura. ....	69
<b>Tabla 30.</b> ANOVA simple de la relación de Poisson. ....	71
<b>Tabla 31.</b> Agrupación de tratamientos según el factor A. ....	72
<b>Tabla 32.</b> Agrupación de tratamientos según el factor B. ....	73
<b>Tabla 33.</b> ANOVA multifactorial del ensayo de asentamiento. ....	75
<b>Tabla 34.</b> ANOVA multifactorial de la velocidad de onda. ....	76
<b>Tabla 35.</b> ANOVA multifactorial del ensayo de compresión simple. ....	76
<b>Tabla 36.</b> ANOVA multifactorial del módulo de elasticidad. ....	78
<b>Tabla 37.</b> ANOVA multifactorial del módulo de ruptura. ....	78
<b>Tabla 38.</b> ANOVA multifactorial de la velocidad de onda. ....	79





Yo *Diego Germán Guamán Matute*, autor de la tesis "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA AUTOCOMPACTANTES REFORZADOS CON FIBRAS METÁLICAS NORMALIZADAS Y FIBRAS METÁLICAS NO NORMALIZADAS", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, 14 de octubre del 2016

*Diego Germán Guamán Matute*

C.I: 0105183172



Yo *Julio Cesar Jurado Mogrovejo*, autor de la tesis "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA AUTOCOMPACTANTES REFORZADOS CON FIBRAS METÁLICAS NORMALIZADAS Y FIBRAS METÁLICAS NO NORMALIZADAS", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, 14 de octubre del 2016

*Julio Cesar Jurado Mogrovejo*

C.I: 0105137665



Universidad de Cuenca  
Facultad de Ingeniería

---

Yo *Diego Germán Guamán Matute*, autor de la tesis "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA AUTOCOMPACTANTES REFORZADOS CON FIBRAS METÁLICAS NORMALIZADAS Y FIBRAS METÁLICAS NO NORMALIZADAS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 14 de octubre del 2016

---

*Diego Germán Guamán Matute*

C.I: 0105183172



Yo *Julio Cesar Jurado Mogrovejo*, autor de la tesis "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA AUTOCOMPACTANTES REFORZADOS CON FIBRAS METÁLICAS NORMALIZADAS Y FIBRAS METÁLICAS NO NORMALIZADAS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 14 de octubre del 2016

*Julio Cesar Jurado Mogrovejo*

C.I: 0105137665



## DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar a este punto y haberme iluminado con sus dones durante los momentos más difíciles de este proyecto y de mi carrera universitaria. A la Virgen María Auxiliadora por ayudarme a jamás desmayar intercediendo ante su hijo en este largo camino.

A mis padres Germán y Mercy por haberme brindado su apoyo y cariño incondicional en cada difícil decisión y en cada momento de tristeza y desesperación. A mi hermana por su atenta escucha de cuanto problema surgía y a mi hermanito por ser el rostro alegre que me ayuda a recordar lo importante que es la familia.

A mis amigos Julio y Miguel con quienes he compartido mucho más que una formación profesional, por ser personas responsables, honorables y de las cuales espero seguir siendo amigo por incontables años más.

A toda mi familia, amigos y maestros que siempre han estado pendientes y prestos a ayudarme en mi vida universitaria.

Diego

Dedico mi esfuerzo, sacrificio, estudio y perseverancia durante estos años a Dios y a la Virgen Dolorosa que me han permitido llegar a esta etapa de mi vida.

De manera especial a mis padres Julio y Silvana quienes me han brindado su apoyo incondicional, además de formarme moral y espiritualmente, a mis hermanos, Carolina y Pedro que siempre han estado pendientes de mí.

A mi abuelita Hilda (†) que siempre me brindó su apoyo.

A mi abuelita Blanca por tanto cariño recibido.

A mis tíos Freddy y Fernando que me han brindado su apoyo, conocimientos y consejos durante estos años.

A mi buen amigo José Luis (†).

A toda mi familia y amigos que me acompañaron a lo largo de mi carrera universitaria.

Julio



## AGRADECIMIENTO

A Dios por habernos guiado durante nuestra carrera.

A nuestras familias por apoyarnos de forma incondicional y por poder encontrar en ellos un modelo de tranquilidad y sabiduría necesaria para enfrentar los problemas, problemas que desde pequeños nos enseñaron a resolverlos con trabajo y perseverancia.

A nuestro director de proyecto de titulación y amigo Ing. Jorge Moscoso, quien siempre estuvo presto a responder nuestras inquietudes y nos ha brindado su total apoyo durante la realización de este proyecto.

A los Ingenieros, Fernando Zalamea, Alfredo Vázquez, Vladimiro Tobar, Fernando Salgado, Fabián Carrasco, Andrés Alvarado, Esteban Sánchez y Pablo Vélez por habernos ayudado en las dificultades que surgieron en las diferentes etapas del proyecto

A los laboratoristas Stalin Cabrera y Arq. Edison Castillo por enseñarnos la operación de los equipos utilizados en el proyecto y brindarnos consejos basados en su experiencia.

A nuestros profesores que durante la carrera universitaria nos han transmitido sus conocimientos resaltando en incontables ocasiones la responsabilidad social de nuestra profesión.

A nuestros amigos y compañeros Jorge y José quienes han sido un gran apoyo durante los múltiples proyectos emprendidos a lo largo de los años.



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Dentro de las necesidades de la sociedad están estructuras que puedan ser utilizadas como viviendas, vías de transporte, centros de reunión y diversión. Cada estructura es proyectada y construida según los materiales conocidos en cada época, así se puede identificar dos periodos denominados artesanal e industrial. La revolución industrial modifica los procesos de producción de los materiales de construcción además de los sistemas constructivos, dando lugar al período industrial (de Villanueva, 2004). El siglo XX junto con el final del siglo XIX fueron caracterizados por el uso del acero y se espera que el siglo XXI sea dominado por la inclusión de productos sintéticos como materiales de construcción (Miravete, 1995). La fabricación de productos metálicos conlleva a la generación de residuos los mismos que de no ser utilizados serán desechados y constituirán un problema para la sociedad (Córdoba, Mera, Martínez, & Rodríguez, 2010). Los residuos generados sin duda gozan de las propiedades del material que los constituyen y varias de estas pueden ser aprovechadas en la construcción a fin de modificar las propiedades del hormigón tanto en estado fresco como endurecido.

El hormigón autocompactante no necesita energía externa para su colocación puesto que se compacta por el efecto de la gravedad, se utiliza desde 1988 en obras civiles. El diseño del hormigón autocompactante por cualquier método se basa en la obtención de una dosificación o diseño de mezcla a la cual se le realizan ajustes en base a prueba error hasta obtener las propiedades deseadas (Cañizares, 2012). Desde 1967 las fibras se han incorporado al hormigón a fin de mejorar sus propiedades antes y después del agrietamiento, investigaciones han demostrado la capacidad de las fibras para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón (ACI 544.5R, 2010) a pesar de esto las aplicaciones de los hormigones reforzados con fibras tienen un papel secundario ya que solo son utilizadas para controlar el agrietamiento y resistir la desintegración del material. (Julián, Giovanni, & Aperador, 2013).

En ingeniería civil nos referimos a los materiales de construcción como la materia prima empleada en la construcción de obras de ingeniería, estos materiales poseen propiedades que varían dependiendo de los procesos de producción o de su origen, así los métodos de diseño de estructuras consideran la resistencia de los materiales (acero, hormigón). Los métodos de diseño y fabricación del hormigón (Mamlouk & Zaniewski, 2009) contemplan un conjunto de propiedades que deben cumplir los materiales que lo conforman con la finalidad de obtener un hormigón de las características deseadas, sin embargo, la gran variabilidad



que tienen los materiales principalmente los áridos conllevan a que los métodos de diseño no entreguen resultados óptimos en una primera dosificación, esto lleva a la generación de repeticiones del método ajustando algún parámetro del diseño, este proceso es considerado una investigación experimental. Existe una herramienta muy potente para el desarrollo de investigaciones experimentales esta es, el diseño de experimentos, el diseño de experimentos se basa en la aplicación de principios y técnicas sobre un conjunto de datos experimentales incluyendo la forma en la que estos datos serán recolectados, todo esto con el fin de obtener una mayor cantidad de información al menor costo posible. (Menéndez, Bonavetti, & Irassar, 2008).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Identificar si la inclusión de fibras metálicas normalizadas y fibras metálicas no normalizadas afectan las propiedades mecánicas del hormigón de alta resistencia autocompactante.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Determinar las propiedades mecánicas en: hormigón de alta resistencia autocompactante, hormigón de alta resistencia autocompactante reforzado con fibras metálicas no normalizadas y hormigón de alta resistencia autocompactante reforzado con fibras metálicas normalizadas.
- Caracterizar las fibras mediante sus propiedades geométricas y físicas (largo, espesor, esbeltez).
- Optimizar los procesos experimentales utilizados comúnmente mediante el diseño estadístico de experimentos.
- Elaborar modelos de regresión y gráficos de superficie para comparar las propiedades mecánicas de los hormigones de alta resistencia autocompactantes con inclusión de fibras contemplados en la región experimental.





### 1.3 Justificación

En general cada obra civil tiene condiciones especiales a ser tomadas en cuenta durante la etapa de diseño, las características propias de cada obra llevan consigo requerimientos mecánicos y físicos para el hormigón que va a ser utilizado. En ocasiones se incrementan algunas de las propiedades mecánicas más conocidas de los hormigones con el único objetivo de mejorar las prestaciones de otras propiedades. Por ejemplo, si se desea variar el módulo elástico del hormigón según la ecuación propuesta por el (Committee, Institute, & Standardization, 2008) se debería variar la resistencia a compresión ya que ambas propiedades son directamente proporcionales. Es importante fabricar hormigones especializados a fin de evitar el desperdicio de recursos, sin embargo, estos requieren la incorporación de compuestos ya sean líquidos o sólidos. Existen aditivos que ya se ocupan en la construcción debido a que los efectos que provocan en el hormigón han sido plenamente identificados tales como escorias de altos hornos, plastificantes, cenizas volantes (Vélez Guayasamín, 2013); en contraposición potenciales aditivos no son utilizados debido a que sus efectos no son conocidos completamente y requieren de estudios, los estudios a realizar con los nuevos materiales de construcción requieren procesos experimentales que ocupan grandes recursos debido al costo de materiales y la necesidad de maquinaria especial, por tanto, es conveniente desarrollar una metodología que minimice el uso de recursos.

Varias estructuras o partes de las estructuras están sometidas a esfuerzos altos, estos esfuerzos conllevan que los ingenieros estructurales sugieran secciones de gran tamaño en los elementos de hormigón que conforman la estructura, a más estas secciones vienen acompañadas de grandes cantidades de refuerzos de acero generando congestión que muchas veces llevan dificultades constructivas además de ser estéticamente no aptas debido a las grandes secciones. El hormigón estudiado en este documento obedece a los requerimientos descritos, es así que tiene propiedades autocompactantes y de alta resistencia permitiendo de esta manera reducir las secciones transversales y facilitar su colocación.

Actualmente en algunos países del mundo ya se utilizan fibras metálicas sin embargo estas fibras son fabricadas específicamente para ser incluidas en hormigón y por tanto ya se conocen sus beneficios (Mendoza, Aire, & Dávila, 2011) aun cuando los efectos que produce su inclusión fueron determinados para materiales de construcción diferentes a los utilizados en el país. En Ecuador la inclusión de fibras como aditivo de hormigón no es una práctica común debido al hecho que no se cuenta localmente con una fábrica productora de este tipo de refuerzo y el distribuidor más grande de la zona no las comercializa puesto que la demanda de estas es baja ya que los beneficios que pueden brindar son



escasamente conocidos. En este proyecto se utiliza fibras de acero resultantes tanto de procesos industriales como artesanales. La inclusión de fibras prevé mejorar la resistencia a tracción del concreto permitiendo reducir la cantidad de acero a utilizar como refuerzo a tracción. Las propiedades del hormigón serán estudiadas apoyándose en el diseño de experimentos debido a que estas metodologías tienen como objetivo la optimización de recursos y la obtención de resultados confiables. El diseño de experimentos es muy utilizado en el ámbito de la investigación, pero pobremente utilizado en nuestro medio, por tanto, incursionar en esta rama será un importante aporte a la actividad de investigación dentro de los materiales de construcción de la zona.

#### 1.4 Hipótesis

- Existe una combinación óptima de inclusión de fibras que produce una minimización en el tiempo del ensayo de asentamiento.
- Existe una combinación óptima de inclusión de fibras que produce una minimización en el módulo elástico obtenido a partir de la velocidad de onda.
- Existe una combinación óptima de inclusión de fibras que produce una maximización en la resistencia a la compresión simple.
- Existe una combinación óptima de inclusión de fibras que produce una minimización en el módulo elástico obtenido a partir de métodos mecánicos.
- Existe una combinación óptima de inclusión de fibras que produce una maximización del módulo de ruptura.
- Existe una combinación óptima de inclusión de fibras que produce una maximización en la relación de Poisson.

#### 1.5 Metodología

El proyecto es de tipo experimental y se desarrolló en el laboratorio de materiales de construcción de la Universidad de Cuenca. Los materiales utilizados se encuentran descritos en la sección 3.1.2 “Fundamentos del diseño estadístico de experimentos”. Se realizaron los ensayos expuestos en el capítulo 2 “Caracterización de los materiales” con el fin de conocer las propiedades de los áridos y de las fibras metálicas debido a que estos presentan una alta variabilidad en contraposición a los demás materiales utilizados en el estudio. Mediante el diseño de experimentos se determinó las dosificaciones a utilizar en la fabricación de los diferentes tipos de hormigón que de ahora en adelante los



llamaremos “tratamientos”, la fabricación del hormigón es descrito en el capítulo 3 “Elaboración y ensayo de hormigones”, para determinar las propiedades de los diferentes tipos de hormigón se ejecutaron los ensayos descritos en el subcapítulo 3.3 “Propiedades mecánicas del hormigón”, los ensayos realizados tanto al hormigón como a los materiales de construcción se basan en la normativa ASTM. Los datos son recolectados y tabulados. Se realizó un análisis de varianza simple para cada variable respuesta (asentamiento, velocidad de onda, resistencia a la compresión simple, módulo de ruptura, módulo elástico, relación de Poisson) con la finalidad de detectar qué tratamientos muestran una diferencia estadísticamente significativa. Se realizó un análisis de varianza multifactorial para cada variable respuesta con la finalidad de identificar como los factores (fibras) afectan el comportamiento del hormigón, así como determinar qué efectos son significativos. Se realizó una regresión lineal múltiple a fin de determinar un modelo matemático que explique el comportamiento de las variables respuesta. En base a los modelos matemáticos se elaboraron gráficos en 3 dimensiones que ayudan a entender visualmente el fenómeno. Los resultados se analizaron para dar respuesta a las hipótesis planteadas.



## **CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

### **2.1 Selección de Materiales**

El principal criterio para la selección del árido fino fue su contenido de finos, la arena seleccionada tiene 1% de finos y es de granulometría gruesa con un tamaño máximo de agregado de 2.86 mm. El principal criterio para la selección del árido grueso es el tamaño máximo nominal 3/8" debido a que el hormigón es proyectado para ser utilizado en zonas de alta congestión de refuerzo a tracción. Los áridos fueron comprados a SERVICIOS Y MATERIALES CORDERO VINTIMILLA, y son obtenidos mediante minería a cielo abierto y posterior trituración en el sector Panamericana Norte Km 7.5. El cemento seleccionado es de tipo GU (para construcción en general) que cumple con la normativa (NTE INEN 2380, 2011), de la marca comercial HOLCIM. El agua es proporcionada por la empresa ETAPA EP, la misma que garantiza que el agua suministrada es apta tanto para el consumo humano como industrial. El aditivo utilizado es proveniente de la casa comercial SIKA, y es un reductor de agua de alto rango e hiperplastificante con una composición de polímeros policarboxilatos, y cumple a plenitud la norma (ASTM C 494, 2008). En el capítulo 3 se aborda de una manera más amplia el uso de los materiales seleccionados para la mezcla.

### **2.2 Propiedades mecánicas del árido grueso y fino**

#### **2.2.1 Granulometría**

La granulometría sirve para conocer la graduación de los materiales a emplearse en el hormigón, tanto el árido grueso como el árido fino deben ser sometidos a este proceso. Los áridos a emplearse deben cumplir requisitos establecidos en la norma (ASTM C 33, 2016). La normativa que establece el procedimiento de ensayo es la (ASTM C 136, 2014).

Para realizar el análisis granulométrico se debe preparar la muestra, la cual debe estar seca, se prepara para el árido fino 800 gr y para el árido grueso 5000 gr. Se selecciona la serie de tamices estándar para realizar el cribado del árido fino, la misma que consta de los tamices N: 4, N: 8, N: 16, N: 30, N: 50, N: 100 y N: 200, la serie de tamices estándar nos permite obtener el módulo de finura, parámetro que es necesario en el diseño del hormigón. El árido grueso utilizado




es proveniente de la trituración con un tamaño de  $3/8''$  (9.5mm) por lo que para su análisis se utilizan los tamices N: 4, N: 8, N: 16 y N: 30

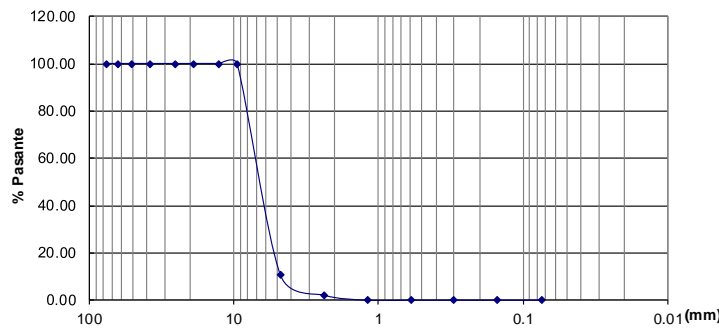
Para realizar el cribado se utiliza una tamizadora mecánica durante un tiempo suficiente, el tiempo de cribado es suficiente si durante 1 minuto de un nuevo cribado no pasa más del 1% de la masa retenida en cualquier tamiz que se observe. Una vez finalizado el proceso de cribado se pesa la masa retenida en cada tamiz con una exactitud del 0.1% de la masa total de la muestra utilizada, la masa total después del cribado debe ser similar a la masa total inicial con una precisión del 0.3%, si hay una diferencia mayor el ensayo no debe ser utilizado.

Resultados:

- Árido grueso

	PROYECTO:	Estudio de las propiedades mecánicas de hormigones reforzados con compuestos de diferentes propiedades elásticas	REALIZADO	Diego Guamán Matute
	SOLICITADO POR:	Ing. Jorge Moscoso		Julio Jurado Mogrovejo
	DESCRIPCION DEL MATERIAL:	Arido grueso		Jose Abad Gonzales
	PROCEDENCIA:	Panamericana Norte Km 9.5 - Mina Cordero Vintimilla		Jorge Romero Loyola
	FECHA:	15/2/2016	PESO DE LA MUESTRA	5000 gr
GRANULOMETRIA ARIDO GRUESO				ASTM D 422

		Desing. del Tamiz	Peso Retenido gr.	Peso Retenido gr. Real	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa		
PIEDRA O CANTOS		4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
		3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
GRAVA	GRUESA	2 1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
		2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
		1 1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
		1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
		3/4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
		1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
	FINA	3/8	6.00	6.00	0.12	0.12	99.88		
		N° 4	4456.00	4467.63	89.35	89.47	10.53		
		ARENA	GRUESA	N° 8	418.00	419.09	8.38	97.85	2.15
			MEDIA	N° 16	107.00	107.28	2.15	100.00	0.00
N° 30	0.00			0.00	0.00	100.00	0.00		
FINA	N° 50		0.00	0.00	0.00	100.00	0.00		
	N° 100		0.00	0.00	0.00	100.00	0.00		
	N° 200		0.00	0.00	0.00	100.00	0.00		
	P N° 200	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00			




MF 5.87

Figura 1. Granulometría árido grueso.



- Árido fino

	PROYECTO:	Estudio de las propiedades mecánicas de hormigones reforzados con compuestos de diferentes propiedades elasticas	REALIZADO	Diego Guamán Matute
	SOLICITADO POR:	Ing. Jorge Moscoso		Julio Jurado Mogrovejo
	DESCRIPCION DEL MATERIAL:	Arido fino		Jose Abad Gonzales
	PROCEDENCIA:	Panamericana Norte Km 9.5 - Mina Cordero Vintimilla	PESO DE LA MUESTRA	Jorge Romero Loyola
	FECHA:	15/2/2016		800 gr
GRANULOMETRIA ARIDO FINO				ASTM D 422

		Desing. del Tamiz	Peso Retenido gr,	Peso Retenido gr, Real	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
PIEDRA O CANTOS		4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		2 1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
GRAVA	GRUESA	2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		1 1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		3/4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	FINA	3/8	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		1/4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		Nº 4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	ARENA	GRUESA Nº 8	89.35	89.59	11.20	11.20	88.80
		MEDIA Nº 16	162.25	162.69	20.34	31.54	68.46
		Nº 30	202.42	202.97	25.37	56.91	43.09
		FINA Nº 50	217.60	218.19	27.27	84.18	15.82
		Nº 100	112.20	112.51	14.06	98.24	1.76
		Nº 200	10.95	10.98	1.37	99.62	0.38
		P Nº 200	3.06	3.07	0.38	100.00	0.00

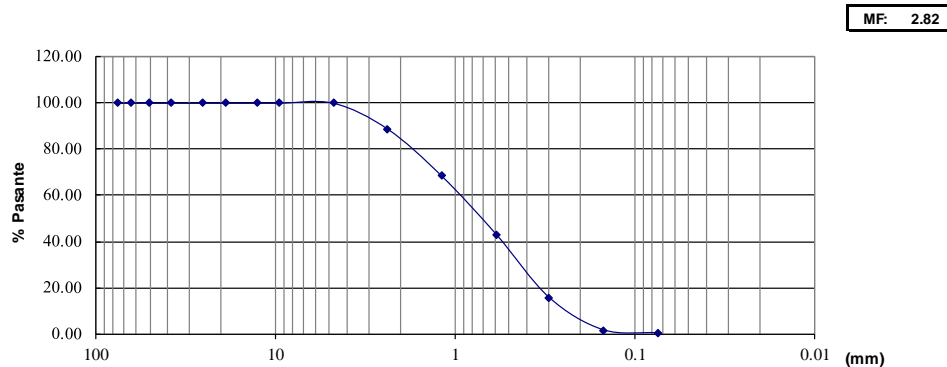


Figura 2. Granulometría árido fino.

- Árido Fino Combinado

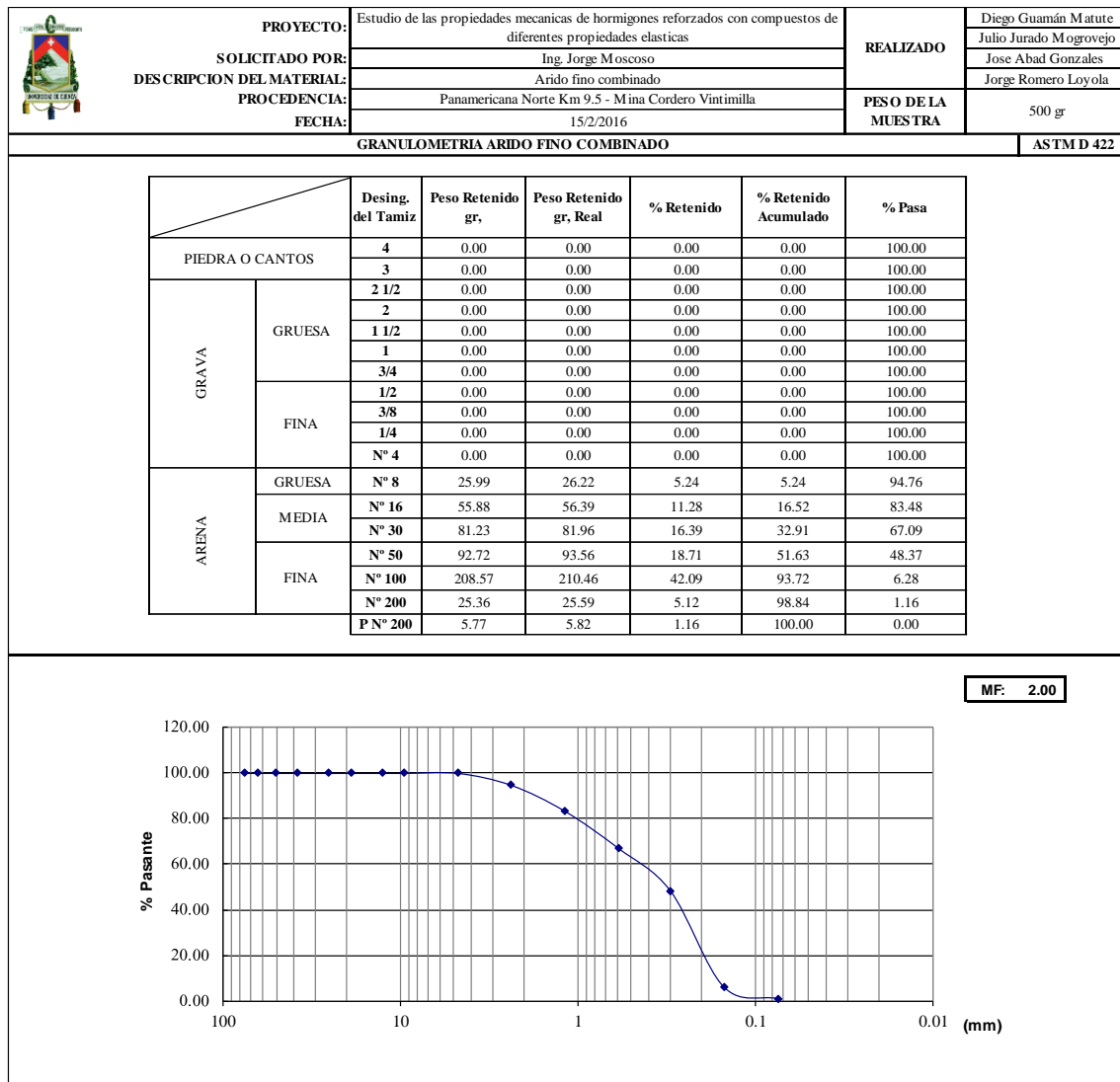


Figura 3. Granulometría árido fino combinado.

## 2.2.2 Humedad

La humedad afecta considerablemente la cantidad de agua utilizada para la fabricación del hormigón por lo que para el proyecto se trabajó con materiales que fueron secados hasta obtener una humedad total del 0% de tal manera la variable humedad queda bloqueada y no influye en el diseño de la mezcla. Para verificar que los áridos cumplan con lo anteriormente planteado, se obtiene la humedad según la norma (ASTM C 566, 2004).

Para determinar el contenido de humedad se muestrea el material de acuerdo a la norma, el tamaño de la muestra está en función del tamaño máximo nominal del árido, este material es colocado en bandejas y llevado al horno para que sea secado con una temperatura constante, para comprobar que no exista humedad se retira la bandeja con material del horno y con un vidrio se comprueba que no haya vapor de agua, de esta manera se dice que el árido está completamente seco y se debe obtener la nueva masa de la muestra.

Para obtener el contenido de humedad se utiliza la siguiente fórmula:

$$\%H = \frac{100(W-D)}{D} \quad (\text{EC. 1})$$

Donde:

%H= Porcentaje de humedad

W= Masa de la muestra húmeda

D= Masa de la muestra seca

Resultados:

Agregado	Humedad
Árido Fino	0.00%
Árido Fino Combinado	0.00%
Árido Grueso	0.00%

**Tabla 1.** Porcentaje de humedad de los áridos.

### 2.2.3 Absorción

La absorción en cada árido es indispensable al momento de calcular el agua que necesita la mezcla, ya que el agua añadida debe ser suficiente para suplir la absorción de los áridos y la cantidad necesaria para hidratar el cemento según el diseño planteado. Para determinar el porcentaje de absorción se sigue la norma (ASTM C 128, 2004) y (ASTM C 127, 2004) para agregado fino y grueso respectivamente, las normas además describen el ensayo para la determinación de densidad y densidad relativa (gravedad específica).

La muestra de árido fino a ser utilizada tiene que ser secada y posteriormente debe permanecer sumergida en agua por 24 horas, para luego esparcirla sobre



una superficie plana no absorbente y secar el árido hasta que se encuentre en condición saturado superficialmente seco (SSS), para verificar la condición SSS se debe colocar el material en el molde para ensayo y compactar con 25 golpes ligeros, posteriormente se retira el molde y si el árido se desprende ligeramente se ha llegado a la condición SSS, para finalizar se obtiene la masa del árido en condición SSS.

El árido grueso debe ser secado hasta tener una masa constante y luego permanecer sumergido por 24 horas posteriormente debe ser colocado sobre un paño absorbente el mismo que sirve para eliminar la capa visible de agua sobre el árido, una vez realizado esto el árido se encuentra en condición SSS y se debe determinar su masa.

El porcentaje de absorción se obtiene según la siguiente fórmula tanto para el árido fino como para el árido grueso

$$\text{Absorción \%} = \frac{S-A}{A} \times 100 \quad (\text{EC. 2})$$

Donde:

Absorción %= Porcentaje de absorción

S= Masa de la muestra saturada superficialmente seca

A= Masa de la muestra seca al horno

Resultados:

Agregado	Absorción
Árido Fino	3.31%
Árido Fino Combinado	1.83%
Árido Grueso	2.35%

**Tabla 2.** Porcentaje de absorción de los áridos.

### 2.2.3 Peso Específico

La muestra de árido fino debe ser preparada para llegar a condición SSS descrita anteriormente, se llena el picnómetro con agua y se introduce en el picnómetro 500 gr de árido fino en condición SSS, se elimina todas burbujas de aire y se toma la masa del picnómetro lleno con muestra y agua, posteriormente se retira



el árido fino y se seca hasta conseguir una masa constante, se toma la masa de la muestra seca, para finalizar se obtiene la masa del picnómetro lleno con agua.

$$\text{Densidad relativa (SH)} = \frac{A}{B+S-C} \quad (\text{EC. 3})$$

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{S}{B+S-C} \quad (\text{EC. 4})$$

$$\text{Densidad relativa aparente (SSS)} = \frac{A}{B+A-C} \quad (\text{EC. 5})$$

$$\text{Densidad (SH)} = \frac{997.5 A}{B+S-C} \quad (\text{EC. 6})$$

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{997.5 S}{B+S-C} \quad (\text{EC. 7})$$

$$\text{Densidad aparente (SSS)} = \frac{997.5 A}{B+A-C} \quad (\text{EC. 8})$$

Donde:

A= masa de la muestra seca

B= masa del picnómetro lleno con agua

C= masa del picnómetro lleno con muestra y agua

S= masa de la muestra saturada superficialmente seca

Preparar el árido grueso en condición SSS y tomar su masa, colocar la muestra en el recipiente y determinar su masa aparente en agua, retirar la muestra del recipiente y secar hasta tener una masa constante para finalizar obtener la masa de la muestra seca.



$$\text{Densidad relativa (SH)} = \frac{A}{B-C} \quad (\text{EC. 9})$$

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{B}{B-C} \quad (\text{EC. 10})$$

$$\text{Densidad relativa aparente (SSS)} = \frac{A}{A-C} \quad (\text{EC. 11})$$

$$\text{Densidad (SH)} = \frac{997.5 A}{B-C} \quad (\text{EC. 12})$$

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{997.5 B}{B-C} \quad (\text{EC. 13})$$

$$\text{Densidad aparente (SSS)} = \frac{997.5 A}{A-C} \quad (\text{EC. 14})$$

Donde:

A= masa de la muestra seca

B= masa de la muestra saturada superficialmente seca

C= masa aparente en agua de la muestra saturada

Resultados:

Agregado	Densidad relativa (SH)	Densidad relativa (SSS)	Densidad relativa aparente(SSS)	Densidad (SH) (kg/m3)	Densidad (SSS) (kg/m3)	Densidad aparente (SSS) (kg/m3)
Árido Fino	2.51	2.59	2.73	2501.50	2584.20	2727.63
Árido Fino Combinado	2.47	2.51	2.58	2461.17	2506.28	2577.75
Árido Grueso	2.55	2.61	2.71	2542.21	2602.06	2704.47

**Tabla 3.** Densidad relativa de los áridos.

## 2.2.4 Forma

La norma (NTE INEN 0872, 2011) presenta la Tabla 6 como una manera simple de clasificar el árido según su forma, este método simplifica la definición de las características superficiales.



Clasificación	Descripción	Ejemplo
<b>Redondeada</b>	Formadas completamente por desgaste	Gravas de río, mar, desierto, arenas de mar o transportadas por el viento
<b>Irregular o parcialmente redondeada</b>	Formadas parcialmente por desgaste, tienen algunos bordes redondeados. Irregulares por naturaleza	Gravas y arenas de canteras tierra y pedernal de pozos excavados
<b>Angular</b>	Poseen bordes bien definidos, formados en la intersección de caras planas ásperas	Rocas trituradas de todos los tipos, pedregullo
<b>Laminar</b>	Partículas en las cuales el espesor es relativamente pequeño comparado con el ancho y/o longitud	Rocas laminadas
<b>Alargada</b>	Partículas usualmente angulares en las cuales la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones	
<b>Laminar y Alargada</b>	Partículas que tienen la longitud considerablemente mayor que el ancho, y este considerablemente mayor que el espesor	

**Tabla 4.** Tabla de la norma NTE INEN 0872, 2011 para la clasificación de los áridos.

Resultados:

Agregado	Forma
Árido Fino	Redondeada
Árido Fino Combinado	Redondeada
Árido Grueso	Angular

**Tabla 5.** Clasificación de los áridos.

## 2.3 Propiedades geométricas y físicas de las fibras metálicas normalizadas y no normalizadas

### 2.3.1 Tamaño y Forma

#### - Fibras normalizadas

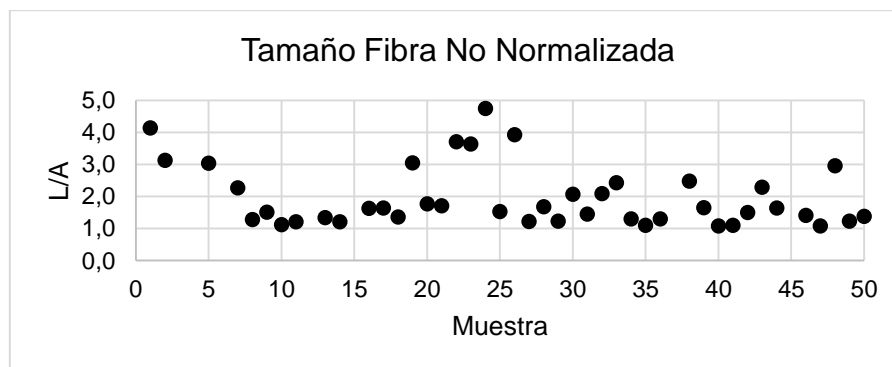
Los datos son obtenidos de las especificaciones técnicas del producto dadas por el fabricante (las especificaciones se encuentran en el anexo), en el presente estudio el fabricante es SIKA, la fibra utilizada tiene una longitud de 35 mm y un diámetro de 0.54 mm, con una relación longitud/diámetro de 65.

Las fibras normalizadas son alargadas con sus extremos conformados y de sección rectangular.

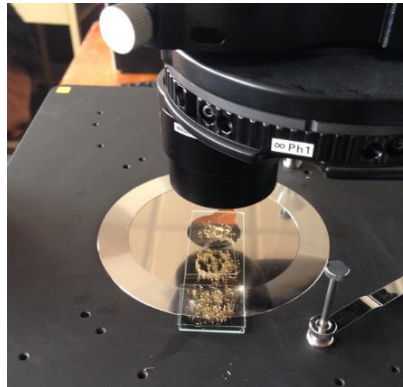
#### - Fibras No normalizadas

Para obtener las dimensiones de la fibra se necesita de un equipo especializado, se lleva una muestra de fibras a un análisis microscópico realizado en el laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, para el análisis se utilizó el equipo Nikon Eclipse Ti y una cámara Nikon DS-QI2 el informe del análisis realizado se encuentra en los anexos, el resultado es una longitud promedio de 0.321 mm y un ancho promedio de 0.161 mm, a esto le corresponde una relación longitud/ancho de 2.

Las fibras no normalizadas son alargadas y de sección rectangular. La forma de la fibra influye directamente en la adherencia de la fibra con el hormigón.



*Figura 4. Relación L/A fibra no normalizada.*



**Figura 5.** *Análisis microscópico fibra no normalizada.*



**Figura 6.** *Imagen compuesta obtenida del análisis microscópico de la fibra no normalizada.*

### 2.3.2 Peso específico

Para determinar el peso específico o la densidad se tomó una muestra de cada tipo de fibra con una masa determinada y esta se coloca dentro de una probeta con un volumen de agua establecido, se toma la lectura del nuevo volumen con la inclusión de las fibras y se obtiene la densidad con la masa de la muestra y el volumen desplazado

Resultados:

Fibra	Peso Específico (kg/m <sup>3</sup> )
Normalizada	1254.33
No Normalizada	8115.00

**Tabla 6.** *Peso específico de las fibras.*

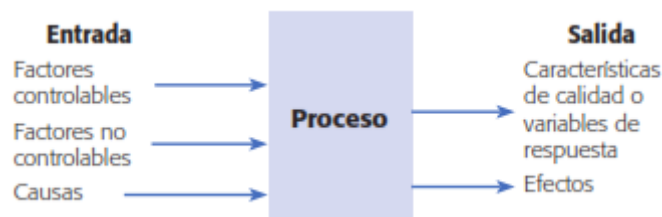
## CAPÍTULO 3: ELABORACIÓN Y ENSAYO DE HORMIGONES

### 3.1 Diseño estadístico de experimentos

(Bernard & MENSING, 1975) definen al DEE (diseño estadístico de experimentos) como los pasos que se planifican y ejecutan previos a la experimentación, de tal forma que los datos obtenidos del proceso sean relevantes y adecuados para ser analizados y relacionados con un problema establecido. (Napolitano, 2010) indica que el DEE es una estrategia para la planificación de experimentos que tiene como objetivo alcanzar conclusiones relevantes de forma eficiente. Por otra parte, (Montgomery, 2004) establece que un experimento es “una prueba en la que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida”. Entonces definimos el DEE como la planificación de los pasos a seguir y ejecutarse durante una prueba o experimento, proceso que considerara los cambios deliberados a realizarse en la variable de entrada, todo esto con el objetivo de alcanzar resultados relevantes y de forma económica.

#### 3.1.1 Principios básicos del diseño estadístico de experimentos

En todo proceso, independiente de su finalidad, intervienen diferentes tipos de variables que mediante procesos desembocan en resultados o respuestas. Las variables que intervienen en la entrada de un proceso se llaman factores de entrada y los resultados obtenidos a la salida del proceso se llaman variables respuesta. Los factores de entrada se clasifican en factores controlables y factores no controlables.



**Figura 7.** Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento (Gutiérrez Pulido, 2008).



- Factores controlables.

Los factores controlables son aquellos a los que se puede fijar un valor o nivel dado. La característica principal de estos factores es que pueden ser manipulados según sea conveniente durante el experimento, permitiendo de esta manera generar diferencias entre un grupo de réplicas de otro. En el experimento desarrollado se tienen en cuenta los siguientes factores controlables:

- Cantidad de árido fino
- Cantidad de arena de colma fina
- Cantidad de árido grueso
- Cantidad de agua
- Cantidad de aditivo
- Cantidad de fibra
- Cantidad de cemento
- Calidad de cemento
- Calidad de arena de colma fina
- Calidad de aditivo
- Calidad de fibras normalizadas
- Calidad de agua
- Tiempo de mezclado
- Proceso de mezclado
- Tiempo de curado
- Procesos de curado
- Proceso de llenado y desencofrado de especímenes.
- Humedad de los áridos.
- Tipo de maquinaria y herramientas utilizadas en la fabricación.

- Factores no controlables.

Son factores que no se pueden controlar durante el desarrollo del experimento. En el experimento desarrollado se tienen en cuenta los siguientes factores no controlables:

- Temperatura del ambiente
- Temperatura del agua utilizada en la mezcla
- Temperatura del agua en las piscinas de curado
- Humedad del ambiente
- Calidad de fibras no normalizadas





- Habilidades de los operadores
- Proceso de ensayo de especímenes
- Factores estudiados

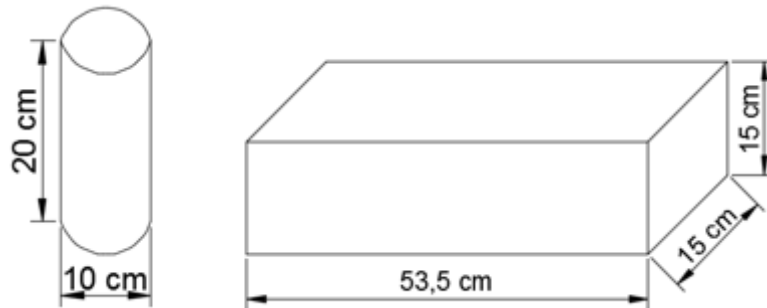
Son los factores que se investigan a fin de conocer cuál es su efecto sobre las variables respuesta. En el experimento desarrollado se toman los siguientes como factores estudiados:

- Cantidad de fibra normalizada
- Cantidad de fibra no normalizada
- Variables respuesta.

Las variables respuesta son aquellas obtenidas tras realizar un proceso, en el experimento desarrollado se tienen en cuenta los siguientes:

- Asentamiento
- Resistencia a compresión
- Módulo de elasticidad
- Relación de Poisson
- Módulo de ruptura
- Velocidad de onda
- Replicas, niveles y tratamientos

Se considera una réplica o unidad experimental a una pieza o muestra que sea representativo del resultado del experimento. En el experimento desarrollado la réplica es un cilindro y una vigueta de hormigón para cada respuesta buscada, es decir el cilindro de hormigón constituye una réplica para el estudio de la resistencia a compresión, módulo de elasticidad y módulo de Poisson mientras que una vigueta de hormigón constituye una réplica para el estudio del módulo de ruptura.

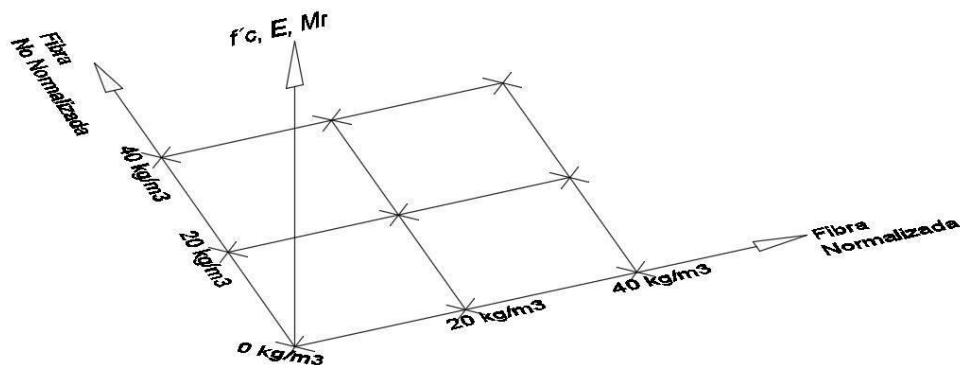


**Figura 8.** Dimensiones de los especímenes fabricados.

Si a un grupo de réplicas se le asigna un valor específico de un factor estudiado este grupo de réplicas se le considera pertenecientes a un nivel. Las combinaciones de niveles generan un tratamiento. En el experimento desarrollado se tienen en cuenta los siguientes niveles y tratamientos:

Nivel de fibra Normalizada	Fibra No Normalizada	Tratamiento
kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	
0	0	1
20 (50%)	0	2
40 (100%)	0	3
0	20 (50%)	4
20 (50%)	20 (50%)	5
40 (100%)	20 (50%)	6
0	40 (100%)	7
20 (50%)	40 (100%)	8
40 (100%)	40 (100%)	9

**Tabla 7.** Niveles y tratamientos.



**Figura 9.** Distribución de las combinaciones de niveles.

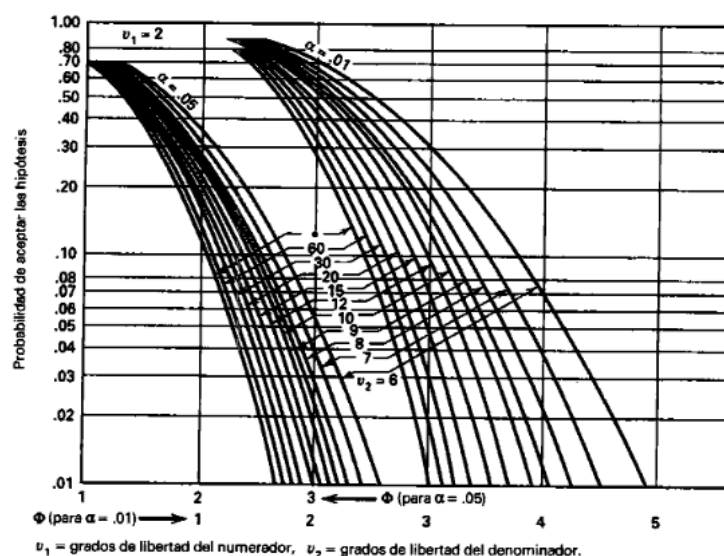
### 3.1.2 Fundamentos del diseño estadístico de experimentos

El diseño experimental debe ser complementado con un enfoque estadístico debido a que los datos utilizados en el experimento están sujetos a errores experimentales y por tanto la metodología estadística brinda un enfoque objetivo de análisis. El diseño de experimentos se fundamenta en:

- Elaboración de réplicas

Las réplicas dentro de un diseño de experimentos permiten conocer el error experimental el mismo que será utilizado para determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente diferentes. Además, si se utiliza la media muestral para estimar el efecto de un factor en el experimento se obtienen estimaciones con mayor precisión.

La cantidad de réplicas se calcula utilizando la resistencia a compresión ya que el diseño de hormigones por el método del ACI contempla una diferencia de 35 kg/cm<sup>2</sup> como la máxima admisible entre  $f'_c$  y  $f'_{cr}$  generando una diferencia de 70kg/cm<sup>2</sup> como la diferencia máxima admisible entre tratamientos. Para determinar el número de réplicas a fabricar se debe tener en cuenta que cada factor tiene tres niveles (a=3, b=3), se debe ingresar a las curvas de operación que se encuentran en el libro “Diseño y análisis de experimentos” de (Montgomery, 2004).



**Figura 10. Curva de operación (Montgomery, 2004).**



Como se puede observar se debe conocer los grados de libertad del numerador que para nuestro experimento es el número de niveles de cada factor menos uno, los grados de libertad del denominador está dado por la expresión:

$$a \times b \times (n - 1) \quad (\text{EC. 15})$$

Para ingresar a la curva de operación se obtiene un valor de  $\Phi$  mediante la expresión:

$$\Phi^2 = \frac{naD^2}{2b\sigma} \quad (\text{EC. 16})$$

Donde

n= número de replicas

a=niveles del factor A

b=niveles del factor B

D=error máximo permitido

$\sigma$ =distribución estándar de la muestra

En el eje de las ordenas se encuentra el valor  $\beta$  el mismo que representa el riesgo de no encontrar diferencia en los tratamientos, si restamos este valor de 1 obtenemos la probabilidad de encontrar diferencia en los tratamientos. Para poder realizar este proceso es necesario establecer al inicio el número de réplicas que creemos es el adecuado.

Para el experimento presentado se cuenta con datos históricos de desviación estándar de experimentos anteriores ( $\sigma=37.5$  kg/cm<sup>2</sup>) se toma este valor como el usado para el cálculo de la muestra. Con todo lo mencionado se obtiene:

Replicas (n)	D (kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. Estándar (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$	B
3	70	37.5	2.28	0.07

**Tabla 8.** Cálculo del número de réplicas.

Con 3 réplicas se logra una probabilidad aproximada del 93% de encontrar diferencia entre los tratamientos.

- Aleatorización

La aleatorización consiste en asignar un orden de fabricación y un orden de ensayos a los especímenes o réplicas de hormigón, así como el orden de uso de la materia prima, esta secuencia es asignada de forma aleatoria o completamente al azar. La aleatorización es importante dentro del DEE puesto que una de las premisas que se toman como ciertas es que las observaciones sean variables aleatorias con distribuciones independientes, mediante la aleatorización este precepto se cumple. En el experimento desarrollado se generó la siguiente matriz aleatoria que representa el orden en el que se fabrican los diferentes tratamientos y sus respectivas réplicas, debido a que los ensayos en el hormigón endurecido se realizan 28 días después de la fabricación el orden de ensayos ocupará la misma matriz que la fabricación.

Tratamiento	Repetición		
	1	2	3
1	1	13	26
2	7	19	23
3	18	5	24
4	12	17	4
5	2	21	11
6	14	8	22
7	15	6	20
8	10	16	27
9	25	3	9

**Tabla 9.** Aleatorización de las repeticiones.

- Formación de bloques

La formación de bloques consiste en aislar o eliminar la variabilidad producida por el efecto que producen factores que no son de interés en el estudio a desarrollar. Se puede definir a un bloque como un conjunto de condiciones experimentales homogéneas. En el experimento desarrollado se formaron bloques de las siguientes características:

- Árido fino: previo a la fabricación del hormigón se realizó la compra de 0.5 m<sup>3</sup> de arena, cantidad suficiente para realizar todas las réplicas de los 9 tratamientos a realizar a más de un porcentaje adicional

considerando que es posible realizar un estudio más robusto posterior a la obtención de resultados. La producción diaria de la mina es mayor a 0.5 m<sup>3</sup> por tanto se garantiza que el volumen adquirido es homogéneo en cuanto a las propiedades de la arena que lo componen. La arena es ensacada y posteriormente transportada al laboratorio de materiales de construcción de la universidad donde cada saco será utilizado de forma aleatoria garantizando así un bloqueo completo en cuanto a la variabilidad que podría generar el uso del árido fino.



**Figura 11.** Ensacado y almacenamiento de los áridos.



**Figura 12.** Mina de árido fino.



**Figura 13.** Muestra de árido fino.



- Arena de colma fina: previo a la fabricación del hormigón se realizó la compra de 8 sacos de arena de colma fina, cantidad suficiente para realizar todas las réplicas de los 9 tratamientos a realizar a más de un porcentaje adicional considerando que es posible realizar un estudio más robusto posterior a la obtención de resultados. La arena de colma fina es comprada a la casa comercial Sika Ecuatoriana S.A., Sika entrega especificaciones técnicas de sus productos que se consideran homogéneas en todos los sacos sin embargo para asegurar la uniformidad y garantizar el bloqueo total se mezcla el contenido de los sacos para obtener el peso requerido para la elaboración de cada tratamiento.
- Árido grueso: previo a la fabricación del hormigón se realizó la compra de 1 m<sup>3</sup> de árido grueso, cantidad suficiente para realizar todas las réplicas de los 9 tratamientos a realizar a más de un porcentaje adicional considerando que es posible realizar un estudio más robusto posterior a la obtención de resultados. La producción diaria de la mina es mayor a 1m<sup>3</sup> por tanto se garantiza que el volumen adquirido es homogéneo en cuanto a las propiedades del árido grueso que lo componen. El árido grueso es ensacada y posteriormente transportado al laboratorio de materiales de construcción de la Universidad de Cuenca donde cada saco será utilizado de forma aleatoria garantizando así un bloqueo completo en cuanto a la variabilidad que podría generar el uso del árido grueso.



**Figura 14.** Mina de árido grueso.



**Figura 15.** Muestra de árido grueso.

- Cemento: previo a la fabricación del hormigón se realizó la compra de 15 sacos de cemento Holcim tipo GU, cantidad suficiente para realizar todas las réplicas de los 9 tratamientos a realizar a más de un porcentaje adicional considerando que es posible realizar un estudio más robusto posterior a la obtención de resultados. Holcim entrega especificaciones técnicas de sus productos que se consideran homogéneas en todos los sacos ya que su producto se encuentra bajo la norma (NTE INEN 2380, 2011) sin embargo para asegurar la uniformidad y garantizar el bloqueo total se mezcla el contenido de los sacos para obtener el peso requerido para la elaboración de cada tratamiento.



**Figura 16.** Muestra del cemento utilizado.

- Aditivo: el aditivo reductor de agua de alto rango utilizado es Viscrocrete 2100 fabricado por Sika Ecuatoriana S.A. Se realiza la compra de 16 kg de aditivo el mismo que se encuentra en presentaciones de 4 kg, cantidad suficiente para realizar todas las réplicas de los 9 tratamientos a realizar a más de un porcentaje adicional considerando que es posible realizar un estudio más robusto



posterior a la obtención de resultados. Sika entrega especificaciones técnicas de sus productos que se consideran homogéneas incluyendo el aditivo utilizado, sin embargo, el tiempo y forma de almacenamiento puede ser diferente en las diferentes porciones del producto, para bloquear por completo esta variabilidad se homogeniza el aditivo mezclando todo en un contenedor de gran capacidad.



**Figura 17.** Aditivo Sika Viscocrete 2100.

- Fibra normalizada: previo a la fabricación del hormigón se realizó la compra de 1 saco de fibra Sika Fiber CHO el mismo que tiene un contenido de 20kg, cantidad suficiente para realizar todas las réplicas de los 9 tratamientos a realizar a más de un porcentaje adicional considerando que es posible realizar un estudio más robusto posterior a la obtención de resultados. Las fibras son compradas a la casa comercial Sika Ecuatoriana S.A., Sika entrega especificaciones técnicas de sus productos que se consideran homogéneas en todas las fibras pertenecientes al saco adquirido sin embargo para asegurar la uniformidad y garantizar el bloqueo total se coloca el contenido del saco en un contenedor de gran tamaño y se realiza una mezcla.



**Figura 18.** Sika Fiber CHO 65/35.

- Fibra no normalizada: previo a la fabricación del hormigón se realizó la compra de residuos de duplicado de llaves (limalla) en diferentes locales de la ciudad, se almacena 20 kg de limalla tamizada, cantidad suficiente para fabricar todas las réplicas de los 9 tratamientos a realizar a más de un porcentaje adicional considerando que es posible un estudio más robusto posterior a la obtención de resultados. Debido a que cada local de duplicado de llaves podría utilizar llaves de diferentes propiedades y diferentes procesos de duplicado la limalla obtenida sería una importante fuente de variabilidad debido a esto se coloca toda la limalla a utilizar en un contenedor de gran tamaño y se mezcla garantizando el bloqueo de esta variabilidad además el proceso de cribado elimina las partículas indeseables.



**Figura 19.** Muestra de fibra no normalizada.

- Curado: previo a la fabricación del hormigón se preparan dos piscinas de curado. La primera piscina servirá para almacenar las viguetas y la segunda piscina almacena los cilindros. Ambas son cuidadosamente limpiadas previo al llenado y los elementos guardados en ellas son cuidadosamente limpiados antes de la sumersión. El curado inicial se realiza en el mismo lugar de hormigonado por un periodo de 24 horas, se protege a las muestras del viento, lluvia y exposición al sol.
- Fabricación, mezclado y llenado: las cantidades a utilizar en los diferentes tratamientos fueron pesadas por el mismo operador (operador 1) utilizando los mismos equipos generando un bloqueo a

los factores operador y equipo. El mezclado se divide en dos secuencias, la primera etapa se desarrolla por parte del operador 1 homogeneizando la mezcla de cemento, arena de colma fina, árido fino y fibras en caso de ser incorporadas. La segunda etapa de mezclado se realiza en una concretera, la misma se humedece y el operador 2 coloca el árido grueso, el operador 3 coloca  $\frac{1}{4}$  de la cantidad de agua necesaria y se mezcla por un tiempo de 1 minuto, el operador 2 coloca en la concretera el resultado de la primera mezcla realizada por el operador 1, enseguida el operador 3 coloca el agua restante mezclada previamente con el aditivo. Se realiza la mezcla por un tiempo de 3 minutos. Una vez la mezcla es homogénea se retira el material de la concretera y se comprueba las características en el hormigón fresco. El operador 2 transporta el hormigón una distancia aproximada de 5m al lugar de llenado y curado inicial, el operador 3 llena el hormigón en los moldes previamente preparados. Todos los procesos son descritos a detalles en el subcapítulo producción de hormigones. El proceso se repite exactamente igual para los 27 tratamientos y cada una de sus repeticiones asegurando el bloqueo en el proceso de fabricación y llenado y curado, todo el proceso es descrito con mayor detenimiento en el apartado “Producción de hormigones”.

- **Humedad:** la humedad de los materiales es una fuente importante de error ya que si bien es posible determinar la humedad de los materiales la precisión de esta determinación conlleva a una variabilidad en la cantidad de agua incluida al hormigón final alterando el objetivo del estudio. Para bloquear este factor los áridos son sometidos a un proceso de secado garantizando una humedad del 0% en todas las fracciones del material.

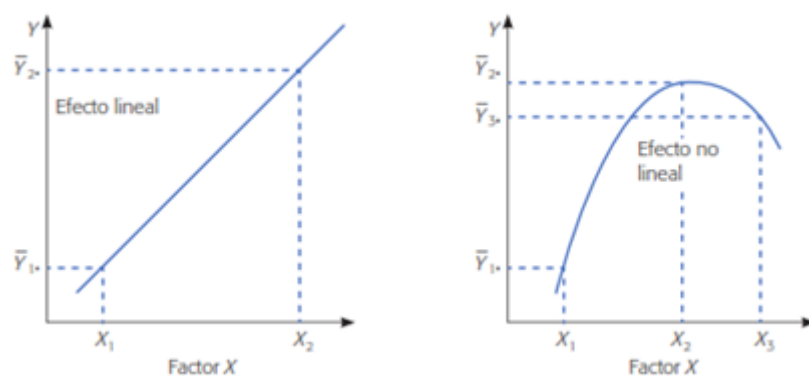
### 3.1.3 Diseño factorial $3^k$ .

El diseño factorial es el diseño más eficiente si se trata de estudiar el efecto de dos o más factores. (Kuehl, 2001). El diseño factorial es el modelo de experimento en el cual se investigan todos los posibles tratamientos generados por la combinación de todos los factores en todos sus niveles. Los diferentes tratamientos a ser estudiados en el diseño factorial generan efectos principales y de interacción los mismos que representan el cambio en la variable respuesta por un cambio en el nivel de un factor. Los efectos que se producen por la

variación de un factor se conocen como efectos principales, sin embargo, la combinación de factores puede provocar que el efecto principal de un factor no sea igual para un diferente nivel de otro, a este efecto se le llama efecto de interacción. El estudio de estos efectos junto a los modelos de regresión y la elaboración de gráficos tridimensionales ayudan a comprender el fenómeno estudiado. Las principales ventajas del diseño factorial son:

- Permiten identificar los efectos principales y de interacción.
- Es posible ampliar o acondicionar el diseño factorial de acuerdo a los resultados de una primera corrida del experimento o durante esta primera corrida.

El diseño factorial  $3^k$  considera “k” factores y cada factor con 3 niveles generando  $3^k$  tratamientos. Un diseño factorial genera una matriz de diseño que contiene el total de tratamientos a evaluar es decir  $3^k$  elementos será el total del diseño factorial a realizar para nuestro caso. Como se mencionó con anterioridad los factores a estudiar son la cantidad de fibra normalizada (factor A) y la cantidad de fibra no normalizada (factor B), por tanto, con k igual a 2 el total de tratamientos es 9, lo que significa 8 grados de libertad entre estas combinaciones de tratamientos. Se escoge el diseño factorial  $3^k$  debido a que el fenómeno podría tener un comportamiento no lineal es decir que tiene efectos de curvatura haciendo poco representativo un diseño factorial  $2^k$ .



**Figura 20.** Ejemplos de efecto lineal y con curvatura (Gutiérrez Pulido, 2008).

Los 9 tratamientos tendrán la siguiente nomenclatura:



Tratamiento	Repetición			Nomenclatura	
	1	2	3	Factor A	Factor B
1	1	13	26	-1	-1
2	7	19	23	0	-1
3	18	5	24	1	-1
4	12	17	4	-1	0
5	2	21	11	0	0
6	14	8	22	1	0
7	15	6	20	-1	1
8	10	16	27	0	1
9	25	3	9	1	1

**Tabla 10.** Nomenclatura de los tratamientos.

En la tabla anterior se entiende que para el tratamiento B que corresponde a la mezcla que no contiene fibras de ninguna clase y cuyo número de tratamiento es 1 tienen las repeticiones 1, 13, 26 y su nomenclatura dentro del diseño  $3^k$  sería (-1,-1) para las tres repeticiones que tienen este tratamiento.

### 3.2 Producción de hormigones

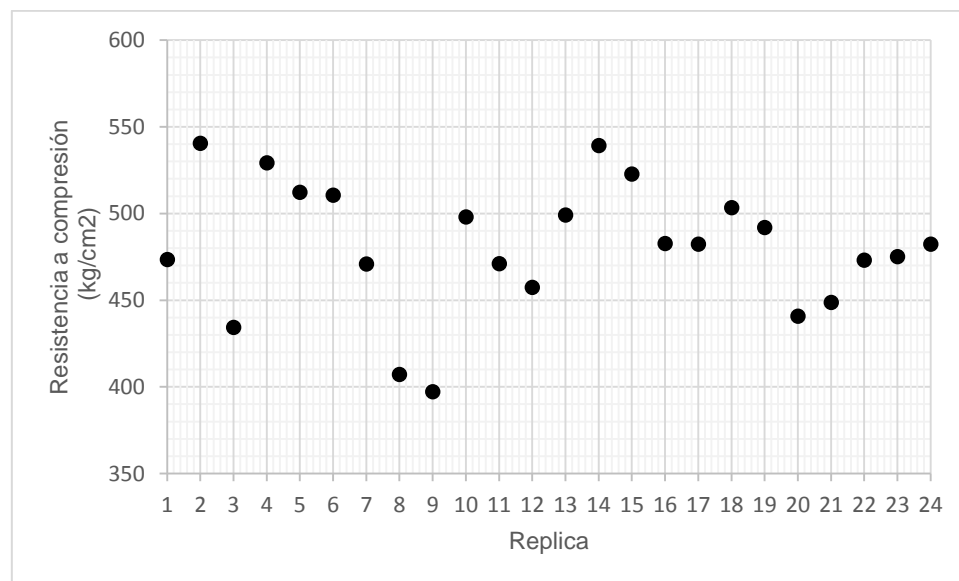
La dosificación del hormigón para el tratamiento 1 o mezcla base sin contenido de fibras es producto de ensayos experimentales pasados que tenían como objetivo desarrollar un hormigón de alta resistencia autocompactante al menor costo. Los pesos presentados a continuación son los necesarios para fabricar una vigueta y 3 cilindros de las dimensiones antes acotadas.

Material	Cantidad (kg)
Árido Fino	6,143
Árido Grueso	18,261
Agua	3,934
Cemento	11,203
Arena de colma fina	5,882
Aditivo	0,201

**Tabla 11.** Dosificación de la mezcla base.

Cilindro	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>		
1	473.42	12	457.37
2	540.42	13	499.07
3	434.19	14	539.12
4	529.20	15	522.74
5	512.11	16	482.65
6	510.55	17	482.22
7	470.77	18	503.33
8	407.06	19	491.82
9	397.14	20	440.63
10	497.94	21	448.56
11	470.89	22	473.07
		23	475.05
		24	482.32

**Tabla 12.** Resistencia a compresión de las réplicas de la mezcla base.



**Figura 21.** Resistencia a compresión de las replicas de la mezcla base.

La cantidad de fibras incluidas en el hormigón es determinada mediante las recomendaciones de la hoja técnica de las fibras normalizadas (Hoja Técnica. Edición 4: 31.03.11 JO Sika Fiber CHO 65/35 NB). En la hoja técnica se establece valores recomendados de 20 y 50 kg de fibra por m<sup>3</sup> de hormigón, como se indicó en el subcapítulo 3.1 “Diseño estadístico de experimentos” los niveles escogidos son 20 y 40 kg/m<sup>3</sup>, con esto las dosificaciones a fabricar son:



Tratamiento 1 (kg)		Tratamiento 2 (kg)		Tratamiento 3 (kg)	
Material	Cantidad (kg)	Material	Cantidad (kg)	Material	Cantidad (kg)
Árido Fino	6,143	Árido Fino	6,143	Árido Fino	6,143
Árido Grueso	18,261	Árido Grueso	18,261	Árido Grueso	18,261
Agua	3,934	Agua	3,934	Agua	3,934
Cemento	11,203	Cemento	11,203	Cemento	11,203
Arena de colma fina	5,882	Arena de colma fina	5,882	Arena de colma fina	5,882
Aditivo	0,201	Aditivo	0,201	Aditivo	0,201
		Normalizada	0,364	Normalizada	0,728

Tratamiento 4		Tratamiento 5		Tratamiento 6 (kg)	
Material	Cantidad (kg)	Material	Cantidad (kg)	Material	Cantidad (kg)
Árido Fino	6,143	Árido Fino	6,143	Árido Fino	6,143
Árido Grueso	18,261	Árido Grueso	18,261	Árido Grueso	18,261
Agua	3,934	Agua	3,934	Agua	3,934
Cemento	11,203	Cemento	11,203	Cemento	11,203
Arena de colma fina	5,882	Arena de colma fina	5,882	Arena de colma fina	5,882
Aditivo	0,201	Aditivo	0,201	Aditivo	0,201
No Normalizada	0,364	No Normalizada	0,364	No Normalizada	0,364
		Normalizada	0,364	Normalizada	0,728

Tratamiento 7		Tratamiento 8		Tratamiento 9	
Material	Cantidad (kg)	Material	Cantidad (kg)	Material	Cantidad (kg)
Árido Fino	6,143	Árido Fino	6,143	Árido Fino	6,143
Árido Grueso	18,261	Árido Grueso	18,261	Árido Grueso	18,261
Agua	3,934	Agua	3,934	Agua	3,934
Cemento	11,203	Cemento	11,203	Cemento	11,203
Arena de colma fina	5,882	Arena de colma fina	5,882	Arena de colma fina	5,882
Aditivo	0,201	Aditivo	0,201	Aditivo	0,201
No Normalizada	0,728	No Normalizada	0,728	No Normalizada	0,728
		Normalizada	0,364	Normalizada	0,728

**Tabla 13.** Dosificación de los diferentes tratamientos del experimento.

Con los pesos establecidos el proceso de fabricación es ejecutado por 3 operadores cuyas tareas en orden de ejecución son:

- 1) Operador 1: Pesar materiales y realizar una mezcla previa de cemento, árido fino y fibras.





*Figura 22. Mezclado inicial.*

- 2) Operador 2: Colocar el árido grueso en la concreteira
- 3) Operador 3: Colocar  $\frac{1}{4}$  del agua pesada y se mezcla por 1 min
- 4) Operador 2: Colocar en la concreteira la mezcla realizada por el operador 1
- 5) Operador 3: Mezclar el agua restante con el aditivo y coloca en la concreteira.
- 6) Se realiza la mezcla por un tiempo de 3 minutos. Una vez la mezcla es homogénea se retira el material de la concreteira y se comprueba las características en el hormigón fresco.
- 7) Operador 2: transporta el hormigón una distancia aproximada de 5m al lugar de llenado y curado inicial.
- 8) Operador 3: coloca el hormigón en los moldes previamente preparados.



*Figura 23. Llenado de probetas.*



El curado inicial se realiza en el laboratorio de materiales de la Universidad de Cuenca por 24 horas, posterior a este periodo se sumergen los cilindros en una piscina de curado hasta los 28 días después de la fabricación, tiempo en el cual se realizan los ensayos a los especímenes fabricados.



**Figura 24.** Piscinas de curado.

Previo a los ensayos de cada espécimen se determina su densidad, el promedio de la densidad de cada tratamiento es:

Tratamiento	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	2361
2	2384
3	2384
4	2405
5	2384
6	2396
7	2422
8	2395
9	2417

**Tabla 14.** Densidad de hormigón endurecido

### 3.3 Propiedades mecánicas del hormigón

#### 3.3.1 Asentamiento

Para la determinación del flujo de asentamiento en hormigón autocompactante se sigue la norma (ASTM C 1611, 2014). Para el ensayo de flujo de asentamiento

se obtiene una muestra del hormigón y se coloca en dentro del molde en forma de cono truncado (Cono de Abrams) sin compactación alguna, el molde y la superficie sobre el que es asentado debe estar previamente humedecido, una vez relleno el molde con hormigón se retira el molde de manera vertical en un tiempo de  $5 \pm 2$ s y se espera que el hormigón se deje de esparcir y se toma dos lecturas ortogonales entre sí del diámetro alcanzado. Para calcular el flujo de asentamiento se utiliza la siguiente fórmula:

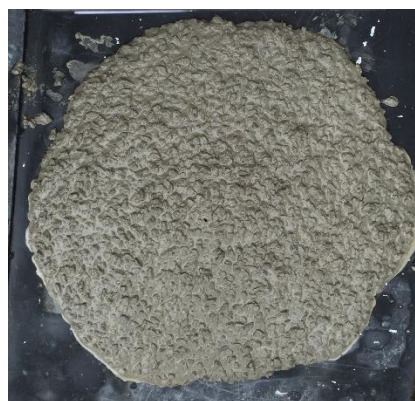
$$\text{Flujo de asentamiento} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{EC. 17})$$

Donde:

$d_1$ = diámetro mayor del esparcimiento del concreto

$d_2$ = diámetro menor del esparcimiento del concreto

Dentro de este ensayo se incluye la velocidad de flujo que está descrita dentro de la norma (ASTM C 1611, 2014) en el apéndice X1. La velocidad de flujo es una medida indirecta de la viscosidad de la mezcla, para su determinación se usa el valor  $T_{50}$  que es el tiempo en el que se demora la mezcla para alcanzar un diámetro de 500mm después de ser retirado el molde del ensayo de flujo de asentamiento. Para determinar el valor  $T_{50}$  se debe usar un cronómetro que permite leer como mínimo 0.01seg. Para finalizar el ensayo se debe anotar el valor  $T_{50}$  más cercano a 0.2 segundos.



**Figura 25.** Ensayo de asentamiento.



Resultados:

Tratamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	13.24	26.36	15.27	14.1	26.06	21.04	14.4	26.13	33.31
<b>Asentamiento (s)</b>	16.57	16.97	30.18	12.52	22.71	27.49	15.14	29.88	36.37
	9.91	15.36	34.71	28.76	19.57	24.76	18.36	24.72	39.43

**Tabla 15.** Resultados del ensayo de asentamiento.

### 3.3.2 Velocidad de onda

Es de importancia este ensayo ya que mediante el mismo se puede obtener el módulo elástico del hormigón de una manera no destructiva, diferente de los métodos convencionales en los cuales un elemento sufre alteraciones físicas y mecánicas. Este ensayo determina directamente el módulo de elasticidad dinámico del hormigón mediante el cual se puede obtener el módulo de elasticidad estático.

Para la realización del ensayo se ha seguido la norma (ASTM C 215, 2014). El ensayo consiste en generar pulsos de ondas longitudinales, estas ondas atraviesan una distancia L entre el transductor transmisor y receptor, se mide el tiempo de tránsito en los transductores y la velocidad de onda se obtiene al dividir el tiempo para la longitud L.

La velocidad de la propagación de onda es una característica que permite determinar la calidad del hormigón, así (Fernández Canovas, 2007) proporciona una tabla que caracteriza al hormigón según la velocidad de onda, los hormigones producidos tienen una velocidad entre 3600 y 4500 m/s lo que corresponde a un hormigón de buena calidad.

Con la velocidad de onda se puede calcular el módulo elástico dinámico del hormigón con la siguiente fórmula propuesta por (Fernández Canovas, 2007):

$$E_D = V^2 * \frac{\gamma}{g} * \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (\text{EC. 18})$$

Donde:

$E_D$ = módulo elástico dinámico del concreto (kg/m<sup>2</sup>)

V= velocidad de onda (m/s)

$\gamma$ = densidad del hormigón (kg/m<sup>3</sup>)  
 $g$ = gravedad (m/s<sup>2</sup>)  
 $\nu$ = relación de Poisson (0.2)

Y mediante la ecuación presentada en (Choudhari & Kumar, 2002)

$$E_E = \frac{(E_D \times 9.806E^{-05}) + 5.9}{1.5} * 10197.162 \quad (\text{EC. 19})$$

Donde:

$E_E$ = módulo elástico estático del concreto (Kg/cm<sup>2</sup>)  
 $E_D$ = módulo elástico dinámico del concreto (Kg/cm<sup>2</sup>)

Resultados:

Tratamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Velocidad de onda (m/s)	4430	4000	4230	4360	4090	4250	4230	4260	4320
	4210	4180	4000	4140	4290	4160	4250	4300	4140
	4230	4400	4170	4190	4350	4200	4320	4070	4320
Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	322526.97	275575.28	301025.56	314029.34	285338.46	312758.94	302611.30	307427.29	314632.42
	296237.42	292500.27	271016.99	298193.03	307767.27	297689.08	300775.83	311773.81	292643.36
	306105.61	320629.07	293656.06	295999.83	319061.94	297192.68	314667.81	283875.73	316835.39

**Tabla 16.** Resultados de velocidad de onda y módulo de elasticidad a partir de la velocidad de onda.



**Figura 26.** Ensayo de ultrasonido.

### 3.3.3 Compresión simple

Para el ensayo de compresión simple a las réplicas (cilindros) se ha seguido la norma (ASTM C 39, 2016). Las probetas deben ensayarse lo más pronto posible luego de ser retirados de la piscina de curado sin que pierda su humedad. El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a una velocidad hasta que ocurra la falla de la probeta y la resistencia de la probeta se calcula dividiendo la carga para el área de la sección transversal de la probeta, las probetas para realizar este ensayo han sido capeadas según la norma (ASTM C 617, 2015) para tener una misma condición de superficie lisa en todas las probetas del experimento planteado. El ensayo se ha realizado a los 28 días de fraguado de las probetas, asegurando que el hormigón ha alcanzado su mayor resistencia.

Resultados:

Tratamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	372.82	407.89	443.02	395.75	473.40	429.12	481.10	422.61	411.12
$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	322.64	386.14	404.22	403.82	316.07	463.65	421.52	420.32	437.04
	355.46	396.32	419.68	465.31	428.36	441.73	470.49	405.97	511.11

**Tabla 17.** Resultados del ensayo de compresión simple.



**Figura 27.** Ensayo de compresión simple.



### 3.3.4 Módulo de elasticidad y Relación de Poisson

El módulo elástico y la relación de Poisson se obtiene siguiendo la norma (ASTM C 469, 2014). Para determinar el módulo elástico y relación de Poisson se debe obtener la deformación longitudinal y transversal de la probeta, para la deformación longitudinal se ha utilizado un deformímetro de alta precisión colocado en la prensa y para la deformación transversal se ha utilizado un extensómetro adaptado para una probeta de 10 cm de diámetro y 20cm de alto. El módulo elástico se determina según la siguiente fórmula:

$$E_E = \frac{(S_2 - S_1)}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad (\text{EC. 20})$$

Donde:

$E_E$ = módulo elástico estático (kg/cm<sup>2</sup>)

$S_2$ = esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última (Kg/cm<sup>2</sup>)

$S_1$ = esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal,  $\varepsilon_1$ , de 50 millonésimas (kg/cm<sup>2</sup>)

$\varepsilon_2$ = deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo  $S_2$

Y la relación de Poisson se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad (\text{EC. 21})$$

Donde:

$\mu$  = relación de Poisson

$\varepsilon_{t2}$ = deformación unitaria transversal en la altura media de la probeta producida por el esfuerzo  $S_2$

$\varepsilon_{t1}$ = deformación unitaria transversal en la altura media del espécimen producida por el esfuerzo  $S_1$

$\varepsilon_2$ = deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo  $S_2$

Resultados:

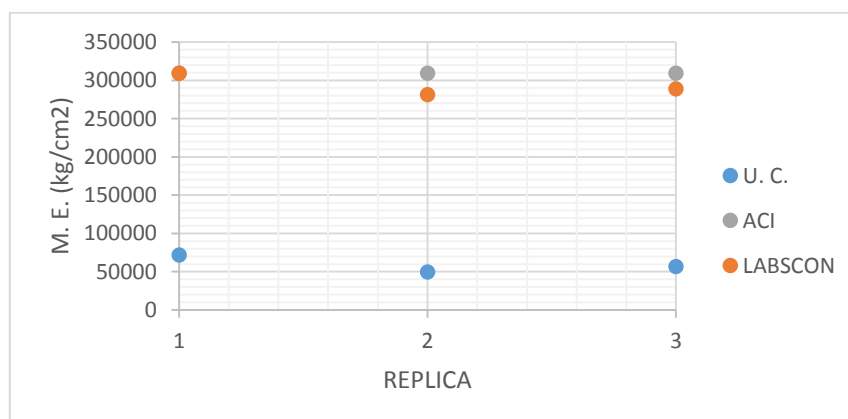
Tratamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	61662.63	73246.69	70829.57	45438.41	77973.28	61932.66	48145.89	63963.22	54526.04
	50840.18	41357.88	40667.29	46729.07	49215.03	47486.33	54889.88	42505.23	38609.53
	52059.82	59016.68	50945.94	60643.57	54973.90	79882.31	63827.23	51831.55	57130.97
<b>Relación de Poisson</b>	0.078	0.094	0.088	0.063	0.153	0.068	0.048	0.087	0.031
	0.084	0.064	0.047	0.014	0.035	0.070	0.097	0.007	0.072
	0.050	0.008	0.054	0.078	0.080	0.089	0.051	0.074	0.071

**Tabla 18.** Resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson.

Los resultados obtenidos no son los esperados considerando que la resistencia media a la compresión simple es de 420 kg/cm<sup>2</sup> y utilizando la ecuación propuesta por ACI ( $E=15100(f_c^{1/2})$ ) el módulo de elasticidad esperado debería estar alrededor de 309458 kg/cm<sup>2</sup>, por lo tanto, se ve la necesidad de validar los resultados obtenidos mediante el ensayo de 6 réplicas en diferentes laboratorios. Se ensayan 3 réplicas en el laboratorio de materiales de la Universidad de Cuenca, 3 réplicas en LABSCON. Los informes de laboratorio se encuentran en anexos.

Laboratorio	U. C.	LABSCON
<b>Módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	72050	309263
	49672	281314
	56807	288786
<b>Media</b>	56807	288786

**Tabla 19.** Validación de datos.



**Figura 28.** Distribución de valores según el laboratorio.





**Figura 29.** Ensayo para módulo de elasticidad y relación de Poisson.



**Figura 30.** Compresómetro laboratorio LABSCON.

Existe una diferencia significativa entre los resultados obtenidos en el laboratorio de la Universidad de Cuenca con el obtenido en LABSCON por lo que es necesario aplicar un factor de corrección a los resultados obtenidos, este factor se obtiene dividiendo las medias de la tabla 18 con lo que el factor de corrección es de 5.084. Así los resultados corregidos son:

Tratamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	313472.3	372361.9	360074.0	230993.8	396390.3	314845.1	244757.7	325167.8	277192.3
	258454.6	210249.7	206739.0	237555.1	250192.9	241404.7	279041.9	216082.5	196278.0
	264654.8	300021.2	258992.2	308291.8	279469.1	406095.1	324476.4	263494.4	290434.9

**Tabla 20.** Resultados de módulo de elasticidad corregidos.

### 3.3.5 Módulo de Ruptura

El ensayo para determinar la resistencia a flexión o módulo de ruptura ha sido realizado según la norma (ASTM C 78, 2002). Para el ensayo se necesita de una viga recta de sección transversal constante a la cual se le aplica una carga con velocidad constante hasta la ruptura, en los tercios de la luz libre. En el experimento presentado, las rupturas de las vigas se producen dentro del tercio medio de la luz libre por lo que el módulo de ruptura se calcula con la siguiente ecuación:



$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (\text{EC. 22})$$

Donde:

R = módulo de ruptura (kg/cm<sup>2</sup>)  
P = carga máxima aplicada (kgf)  
L = longitud de separación entre apoyos (cm)  
b = ancho promedio de la viga (cm)  
d = alto promedio de la viga (cm)

Resultados:

Tratamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	81.90	80.46	79.53	82.29	77.84	67.52	79.43	82.98	90.28
	74.26	78.87	77.56	73.65	72.93	82.38	85.50	79.30	81.99
	78.17	80.52	76.77	87.90	79.08	81.02	80.29	89.41	76.79

**Tabla 21.** Resultados del módulo de ruptura.



**Figura 31.** Ensayo para determinar el módulo de ruptura.



**Figura 32.** Tipo de falla tratamiento 20N20L.



**Figura 33.** Tipo de falla tratamiento 40N40L.



---

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### 4.1 Análisis de varianza simple.

Una vez desarrollado un experimento los datos obtenidos en este deben ser sujetos a un análisis minucioso. El análisis de los datos se debe hacer de la manera adecuada debido a que si por ejemplo simplemente se obtiene una media y estos puntos se grafican podríamos tener una idea del fenómeno y concluir que las medias de cada tratamiento son diferentes y que por tanto uno de los tratamientos es el mejor, al realizar ese procedimiento no se considera el error propio de cada tratamiento ya que solamente la media no representa el tratamiento estudiado.

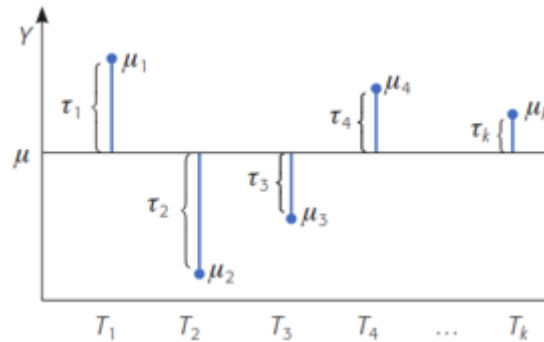
El análisis de varianza (ANOVA) es la técnica principal en cuanto al análisis de datos experimentales. El ANOVA busca separar la variabilidad en cada fuente de variación. La idea es detectar una variabilidad debida a los diferentes tratamientos ensayados y una variabilidad debida al error. El resultado del ANOVA será identificar si las medias de los tratamientos son estadísticamente diferentes o si son iguales, esta identificación se realiza comparando a la variabilidad que aporta los tratamientos con la variabilidad del error, si la primera es mayor a la segunda se comprueba la diferencia entre medias (Gutiérrez Pulido, 2008). Por tanto, la hipótesis a ser probada con el ANOVA es la igualdad de las medias de la variable respuesta obtenidas en cada tratamiento. Lo que se puede escribir como:

$$H_0: u_1=u_2=u_3=.....=u_k \quad (EC. 23)$$

Donde,  $H_0$  es la hipótesis,  $u_1, u_2, u_3, \dots, u_k$  son las medias de los diferentes tratamientos, si esta hipótesis resulta ser comprobada significa que los efectos son de los tratamientos son estadísticamente nulos, pero caso contrario se comprobaría que al menos existe un tratamiento que difiere de los demás (Gutiérrez Pulido, 2008). De forma semejante la hipótesis  $H_0$  se puede transcribir como:

$$H_0: t_1=t_2=t_3=.....=t_k=0 \quad (EC. 24)$$

Si consideramos  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$  como la diferencia entre el valor de la media de cada tratamiento con la media de todos los tratamientos. Este concepto se entiende mejor con la siguiente ilustración.



**Figura 34.** Representación de los efectos de los tratamientos

Con lo que el método de análisis se centra en probar que existe diferencia entre el efecto ( $t$ ) de un tratamiento y el valor de 0, de esta manera se considera la variabilidad total del experimento. La variabilidad total del experimento se representa mediante la suma total de cuadrados dada por la ecuación:

$$SC_T = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (\text{EC. 25})$$

Donde:

$\bar{Y}_i$  : Media de las observaciones del  $i$ -ésimo tratamiento

$\bar{Y}_{..}$  : Promedio de todas las observaciones

$Y_{ij}$  :  $j$ -ésima observación del tratamiento  $i$

En la ecuación se puede identificar que es compuesta por dos partes, la primera representa la suma de cuadrados de los tratamientos y la segunda es la suma de cuadrados del error, de esta manera se identifica con el primer término la variación entre tratamientos y con el segundo la variación dentro del tratamiento. Con lo expuesto y considerando los grados de libertad de cada término los cuadrados medios para cada variabilidad son:



$$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k-1} \text{ y } CM_E = \frac{SC_E}{N-k} \quad (\text{EC. 26})$$

Donde:

$\bar{Y}_i$  : Media de las observaciones del i-esimo tratamiento

$\bar{Y}_..$  : Promedio de todas las observaciones

$Y_{ij}$  : j-esima observación del tratamiento i

$N$  : Total de observaciones

$k$  : Tratamientos

Si relacionamos ambos cuadrados medios en un solo valor:

$$F_o = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E} \quad (\text{EC. 27})$$

En donde si  $F_o$  es grande se entiende que la variación que se detecta entre los tratamientos es mayor a la variación dentro de los tratamientos. Por lo contrario, si  $F_o$  es pequeño se confirma la hipótesis  $H_0$  con lo que los diferentes tratamientos no generan una respuesta significativamente diferente. A fin de rechazar o aceptar con certeza la hipótesis  $H_0$  se fija un nivel de significancia que para el estudio es de 5%, de esta manera “la hipótesis se rechaza si  $F_o > F_{\alpha, k-1, N-k}$ , siendo  $F_{\alpha, k-1, N-k}$  es el percentil  $(1-\alpha) \times 100$  de la distribución F, también se rechaza  $H_0$  si el valor- $p < \alpha$ , donde el valor- $p$  es el área bajo la distribución  $F_{k-1, N-k}$  a la derecha del estadístico  $F_o$ ” (Gutiérrez Pulido, 2008).

A más del resultado del ANOVA se puede representar gráficamente el fenómeno estudiado mediante los diagramas de cajas simultáneos, estos diagramas brindan una idea más clara de la variabilidad de cada tratamiento, así como las diferencias entre tratamientos. En los casos en los cuales se rechaza la hipótesis  $H_0$  se sabe que existe diferencia entre los tratamientos, sin embargo, no se conoce sobre que tratamientos se reconoció la diferencia estadísticamente significativa, para reconocer estos tratamientos de manera gráfica se utilizan los gráficos de medias. Los gráficos de medias son elaborados con intervalos de confianza de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) que se basa en comparar las medias de cada par de tratamientos y obtener un rango para las medias convirtiendo los puntos en rangos, si los rangos de dos tratamientos no se traslapan se puede afirmar que ambos tratamientos son

diferentes si por el contrario sus rangos se traslapan no se puede asegurar que los tratamientos sean diferentes y se debe incrementar la potencia de la prueba hasta asegurar la diferencia de los tratamientos o confirmar que sus medias son estadísticamente iguales. La diferencia poblacional de cada par de tratamientos es comparada con el valor LSD.

$$LSD = t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{2CM_E/n} \quad (\text{EC. 28})$$

Donde:

$t_{\alpha/2, N-k}$ : Se lee en las tablas de la distribución T de Student

$n$ : Número de observaciones

Si la diferencia poblacional de cada par de tratamiento es mayor al valor LSD los tratamientos son diferentes, la comparación de estas diferencias con el valor LSD es indicado en una tabla llamada prueba de múltiples rangos. Los límites de las gráficas de medias están dados por:

$$\bar{Y}_{i.} \pm t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{\frac{CM_E}{n_i}} \quad (\text{EC. 29})$$

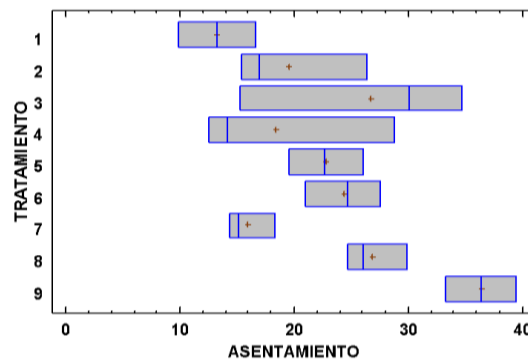
#### 4.1.1 Asentamiento (s)

El valor-P calculado es menor que 0.05, por tanto, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de asentamiento entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significancia.

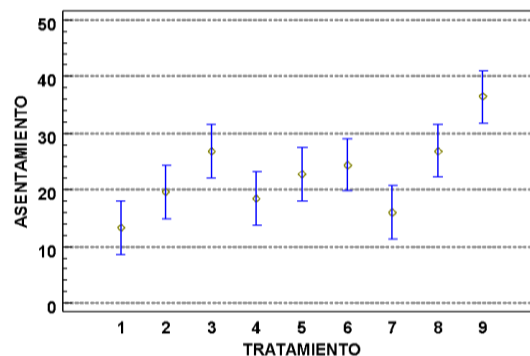
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1159.19	8	144.90	4.80	0.0028
Intra grupos	543.914	18	30.22		
Total (Corr.)	1703.10	26			

**Tabla 22.** ANOVA simple del ensayo de asentamiento.

El gráfico de caja indica que los tratamientos 2, 3 y 4 son los que presentan una mayor variabilidad en sus resultados. El gráfico de medias indica que el tratamiento 9 es el que provoca una mayor demora en segundos en el ensayo de asentamiento, así mismo se nota la existencia de traslapes entre los rangos de los tratamientos, los pares para los que no existe traslape se indican en la prueba de múltiples rangos con un asterisco.



**Figura 35.** Gráfico de Caja y Bigotes para el ensayo de asentamiento.



**Figura 36.** Gráfico de Medias y 95.0% de Fisher LSD para el ensayo de asentamiento.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites			
1 - 2		-6.3233	9.42962	2 - 3		-7.1567 9.42962
1 - 3	*	-13.4800	9.42962	2 - 4		1.1033 9.42962
1 - 4		-5.2200	9.42962	2 - 5		-3.2167 9.42962
1 - 5	*	-9.5400	9.42962	2 - 6		-4.8667 9.42962
1 - 6	*	-11.1900	9.42962	2 - 7		3.5967 9.42962
1 - 7		-2.7267	9.42962	2 - 8		-7.3467 9.42962
1 - 8	*	-13.6700	9.42962	2 - 9	*	-16.8067 9.42962
1 - 9	*	-23.1300	9.42962	3 - 4		8.2600 9.42962
				3 - 5		3.9400 9.42962



3 – 6		2.2900	9.42962	5 – 7		6.8133	9.42962
3 – 7	*	10.7533	9.42962	5 – 8		-4.1300	9.42962
3 – 8		-0.1900	9.42962	5 – 9	*	-13.5900	9.42962
3 – 9	*	-9.6500	9.42962	6 – 7		8.4633	9.42962
4 – 5		-4.3200	9.42962	6 – 8		-2.4800	9.42962
4 – 6		-5.9700	9.42962	6 – 9	*	-11.9400	9.42962
4 – 7		2.4933	9.42962	7 – 8	*	-10.9433	9.42962
4 – 8		-8.4500	9.42962	7 – 9	*	-20.4033	9.42962
4 – 9	*	-17.9100	9.42962	8 – 9	*	-9.4600	9.42962
5 – 6		-1.6500	9.42962				

**Tabla 23.** Prueba de múltiples rangos en el ensayo de asentamiento.

#### 4.1.2 Velocidad de onda (m/s)

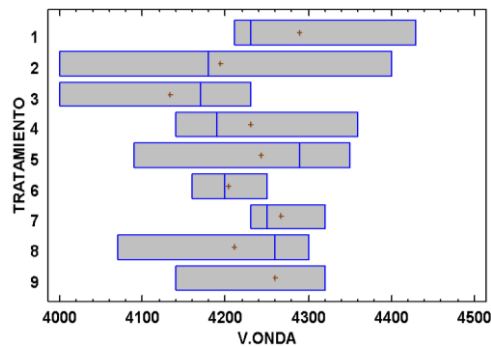
El valor-P calculado es mayor que 0.05, por tanto, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la velocidad de onda entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significancia.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	52933.30	8	6616.67	0.45	0.8722
Intra grupos	262333.00	18	14574.10		
Total (Corr.)	315267.00	26			

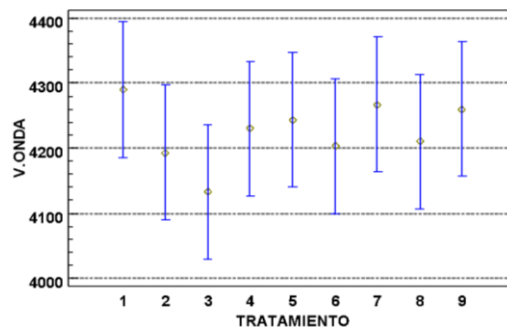
**Tabla 24.** ANOVA simple de la velocidad de onda.

El gráfico de caja indica que los tratamientos tienen una alta variabilidad propia y los datos recolectados en el experimento son semejantes en todos los tratamientos. El gráfico de medias indica como ninguna de las medias es independiente del rango de los demás tratamientos. La velocidad de onda no experimenta cambios representativos en los diferentes tratamientos por lo que no se realiza la prueba de múltiples rangos.





**Figura 37.** Gráfico de cajas y Bigotes para la velocidad de onda.



**Figura 38.** Gráfico de Medias y 95.0% de Fisher LSD para velocidad de onda.

Como se ha descrito en un capítulo anterior, la velocidad de onda se relaciona con el módulo de elasticidad y debido al ANOVA realizado a la velocidad de onda se esperaría que tampoco se reconociera diferencias significativas en el módulo elástico obtenido mediante este método. Realizando un ANOVA para los datos del módulo elástico se obtiene:

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	9.36E+08	8	1.17E+08	0.56	0.7943
Intra grupos	3.74E+09	18	2.08E+08		
Total (Corr.)	4.68E+09	26			

**Tabla 25.** ANOVA simple del módulo de elasticidad obtenido mediante la velocidad de onda.

El valor-P calculado es mayor que 0.05, por tanto, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del módulo de elasticidad calculado a partir de la velocidad de onda entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significancia.

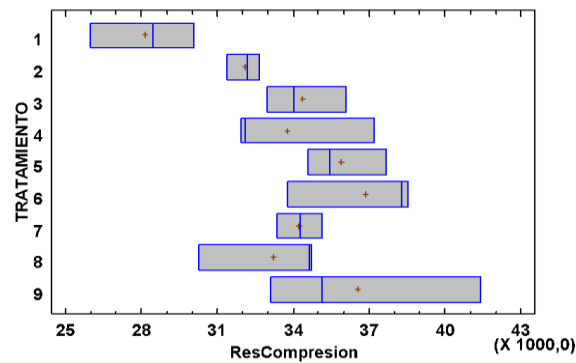
#### 4.1.3 Compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>)

El valor-P calculado es menor que 0.05, por tanto, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la resistencia a la compresión simple entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significancia.

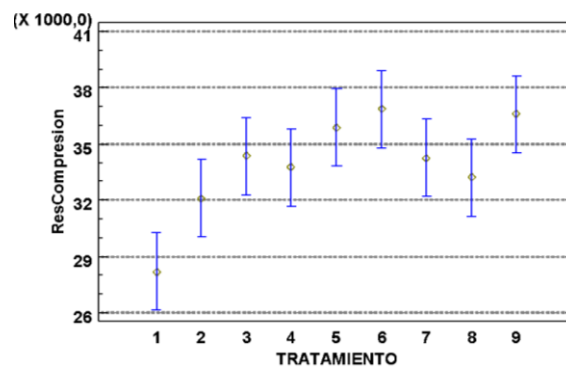
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.70E+08	8	2.12E+07	3.68	0.0103
Intra grupos	1.04E+08	18	5.77E+06		
Total (Corr.)	2.74E+08	26			

**Tabla 26.** ANOVA simple del ensayo de compresión simple.

El gráfico de caja indica que el tratamiento 9 (40 kg/m<sup>3</sup> Normalizada-No normalizada) es el que presentan una mayor variabilidad en sus resultados. El gráfico de medias indica que el tratamiento 1 (Base) es el que tiene como respuesta una menor resistencia a la compresión simple se debe notar que el tratamiento 1 se traslapa con el tratamiento 2 (20 kg/m<sup>3</sup> Normalizada) haciendo imposible distinguir entre estos sin embargo es más probable que el tratamiento 2 pertenezca a los tratamientos que superan al tratamiento 1 a que sea igual a este. Se nota la existencia de traslapes entre los rangos de los tratamientos de mayor resistencia, los pares de tratamientos que no se traslapan se indican en la prueba de múltiples rangos con un asterisco.



**Figura 39.** Gráfico de caja y bigotes para ensayo de compresión simple.



**Figura 40.** Gráfico de Medias y 95.0% de Fisher LSD para el ensayo de compresión simple.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites			
1 - 2		-3921.17	4119.09	2 - 8	-1133.17	4119.09
1 - 3	*	-6187.33	4119.09	2 - 9	-4480.50	4119.09
1 - 4	*	-5581.17	4119.09	3 - 4	606.17	4119.09
1 - 5	*	-7708.83	4119.09	3 - 5	-1521.50	4119.09
1 - 6	*	-8678.17	4119.09	3 - 6	-2490.83	4119.09
1 - 7	*	-6072.50	4119.09	3 - 7	114.83	4119.09
1 - 8	*	-5054.33	4119.09	3 - 8	1133.00	4119.09
1 - 9	*	-8401.67	4119.09	3 - 9	-2214.33	4119.09
2 - 3		-2266.17	4119.09	4 - 5	-2127.67	4119.09
2 - 4		-1660.00	4119.09	4 - 6	-3097.00	4119.09
2 - 5		-3787.67	4119.09	4 - 7	-491.33	4119.09
2 - 6	*	-4757.00	4119.09	4 - 8	526.83	4119.09
2 - 7		-2151.33	4119.09	4 - 9	-2820.50	4119.09
				5 - 6	-969.33	4119.09



5 - 7	1636.33	4119.09	6 - 9	276.50	4119.09
5 - 8	2654.50	4119.09	7 - 8	1018.17	4119.09
5 - 9	-692.83	4119.09	7 - 9	-2329.17	4119.09
6 - 7	2605.67	4119.09	8 - 9	-3347.33	4119.09
6 - 8	3623.83	4119.09			

**Tabla 27.** Prueba de múltiples rangos del ensayo de compresión simple.

No se reconoce una diferencia significativa entre los tratamientos diferentes al tratamiento 1. Es imposible con este experimento determinar cuál de todos los 8 tratamientos es mejor, si se desea obtener una diferencia considerable entre ellos es necesario incrementar la potencia de la prueba.

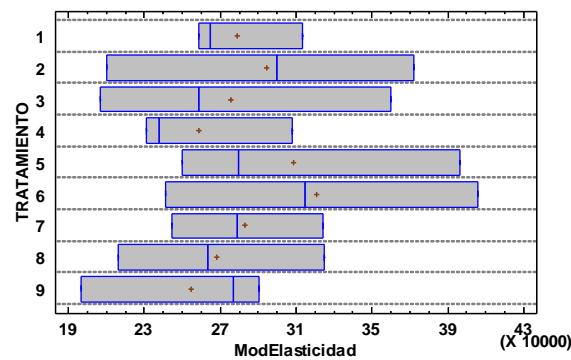
#### 4.1.4 Módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)

El valor-P calculado es mayor que 0.05, por tanto, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del módulo de elasticidad entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significancia.

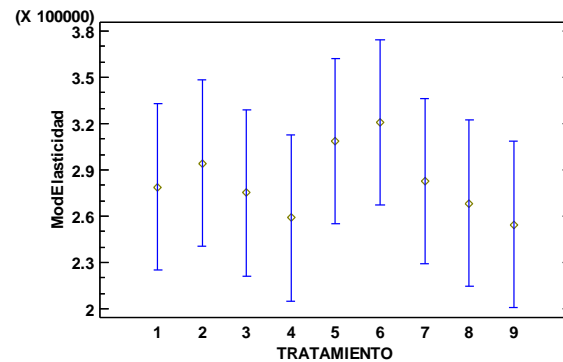
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.16645E+10	8	1.45806E+9	0.37	0.9226
Intra grupos	7.07935E+10	18	3.93297E+9		
Total (Corr.)	8.2458E+10	26			

**Tabla 28.** ANOVA simple del módulo de elasticidad.

El gráfico de caja indica que los tratamientos tienen una alta variabilidad propia y los datos recolectados en el experimento son semejantes en todos los tratamientos. El gráfico de medias indica como ninguna de las medias es independiente del rango de los demás tratamientos. El módulo de elasticidad no experimenta cambios representativos en los diferentes tratamientos por lo que no se realiza la prueba de múltiples rangos.



**Figura 41.** Gráfico de caja y bigotes para módulo de elasticidad.



**Figura 42.** Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para módulo de elasticidad.

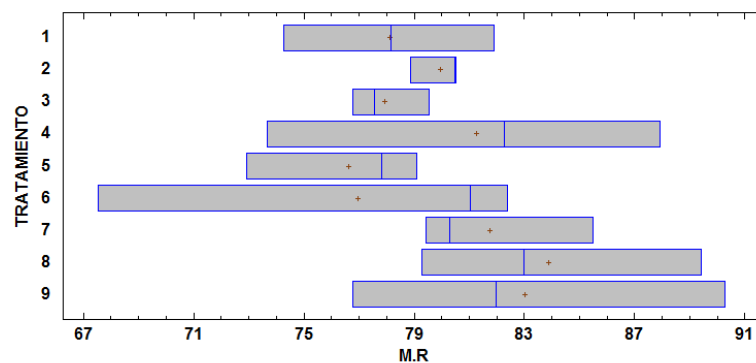
#### 4.1.5 Módulo de ruptura ( $\text{kg/cm}^2$ )

El valor-P calculado es mayor que 0.05, por tanto, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del módulo de ruptura entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significancia.

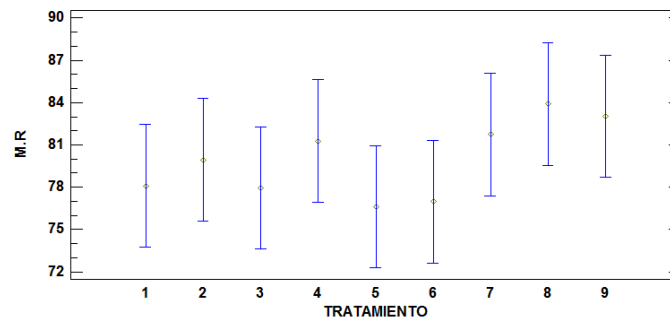
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	171.856	8	21.4819	0.84	0.5810
Intra grupos	460.713	18	25.5952		
Total (Corr.)	632.569	26			

**Tabla 29.** ANOVA simple del módulo de ruptura.

El gráfico de caja indica que los tratamientos tienen una alta variabilidad propia y los datos recolectados en el experimento son semejantes en todos los tratamientos. El gráfico de medias indica como ninguna de las medias es independiente del rango de los demás tratamientos. El módulo de ruptura no experimenta cambios representativos en los diferentes tratamientos por lo que no se realiza la prueba de múltiples rangos.



**Figura 43.** Gráfico de caja y bigotes para módulo de ruptura.



**Figura 44.** Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para módulo de ruptura.

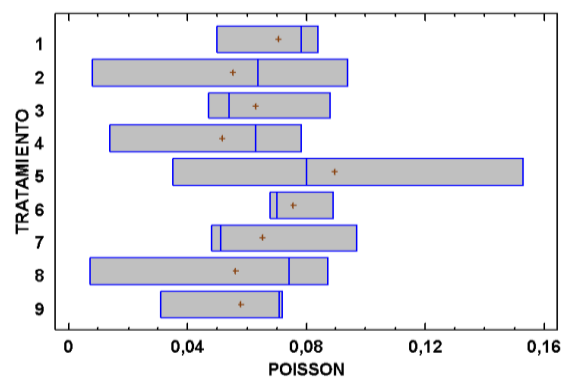
#### 4.1.6 Relación de Poisson

El valor-P calculado es mayor que 0.05, por tanto, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la relación de Poisson entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significancia.

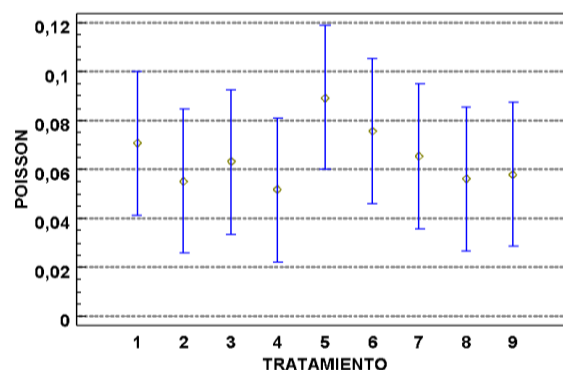
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3.43E-03	8	4.29E-04	0.36	0.9273
Intra grupos	2.13E-02	18	1.18E-03		
Total (Corr.)	2.48E-02	26			

**Tabla 30.** ANOVA simple de la relación de Poisson.

El gráfico de caja indica que los tratamientos tienen una alta variabilidad propia y los datos recolectados en el experimento son semejantes en todos los tratamientos. El gráfico de medias indica como ninguna de las medias es independiente del rango de los demás tratamientos. La relación de Poisson no experimenta cambios representativos en los diferentes tratamientos por lo que no se realiza la prueba de múltiples rangos.



**Figura 45.** Gráfico de caja y bigotes para la relación de Poisson.



**Figura 46.** Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para la relación de Poisson.

## 4.2 ANOVA multifactorial, efectos principales y de interacción.

Los modelos factoriales que incluyen análisis de varianza (ANOVA multifactoriales) son utilizados por muchos investigadores, estos modelos utilizan los efectos principales y los de interacción como los principales resultados a evaluar. Los efectos principales se definen como el cambio que experimenta la variable respuesta debido a un cambio de nivel de un factor. Así mismo, (Pardo, Garrido, Ruiz, & San Martín, 2007) definen la existencia de un efecto de interacción si el efecto de uno de los factores sobre la variable dependiente no es el mismo en todos los niveles del otro factor.

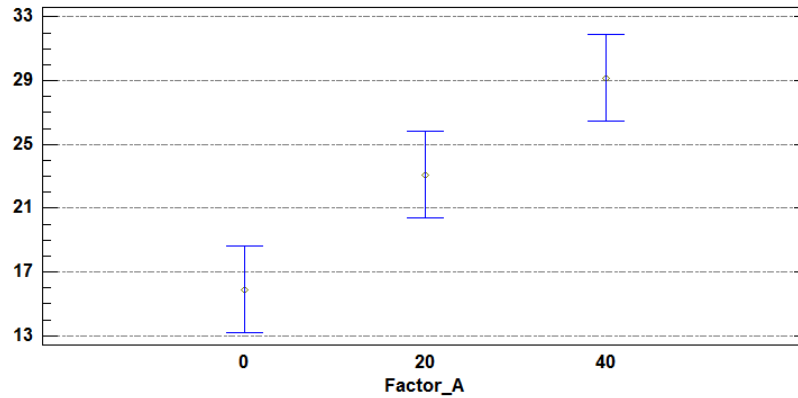
Para la elaboración de los gráficos de efectos principales son considerados miembros de un mismo tratamiento los valores que tienen un mismo nivel si se considera solo un factor es decir que todos los valores pertenecientes al nivel -1 constituyen un solo tratamiento y de manera similar con los niveles 0 y 1. De forma gráfica:

Tratamiento	Nomenclatura	
	Factor A	Factor B
	Fibra Normalizada	Fibra No Normalizada
1	-1	-1
2	0	-1
3	1	-1
4	-1	0
5	0	0
6	1	0
7	-1	1
8	0	1
9	1	1

**Tabla 31.** Agrupación de tratamientos según el factor A.

Todos los valores de la variable respuesta que corresponden a las combinaciones con letra azul son parte de un mismo tratamiento de igual manera con la letra negra y la letra naranja. Con esto la muestra tendría un tamaño de 9 elementos y en el gráfico de medias se coloca la media de estos 9 elementos obteniendo tres medias que reflejan el comportamiento de los efectos principales.





**Figura 47.** Gráfico de medias.

Se pueden elaborar estas gráficas para los efectos principales de ambos factores, el ejemplo anterior hace referencia a los efectos principales del factor A, si se desea obtener el gráfico la siguiente tabla indica de forma semejante al ejemplo anterior cómo deben agruparse los datos.

Tratamiento	Nomenclatura	
	Factor A	Factor B
1	-1	-1
2	0	-1
3	1	-1
4	-1	0
5	0	0
6	1	0
7	-1	1
8	0	1
9	1	1

**Tabla 32.** Agrupación de tratamientos según el factor B.

Sólo se mostrarán los gráficos de efectos principales que correspondan a efectos que sean significativos luego de haber realizado el análisis de varianza multifactorial (ANOVA multifactorial) para cada variable respuesta.

Los efectos de interacción se obtienen graficando las medias de cada de cada tratamiento, los tratamientos en la forma en la que fueron definidos en el capítulo anterior (9 tratamientos, 9 medias), este gráfico se elabora colocando en las abscisas un nivel del factor A y en las ordenadas el valor de las variables respuestas de cada tratamiento y se unen los puntos que corresponden a un mismo nivel del factor B.

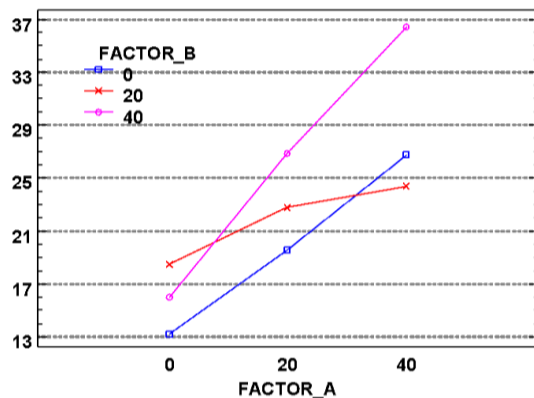


Figura 48. Efectos de interacción.

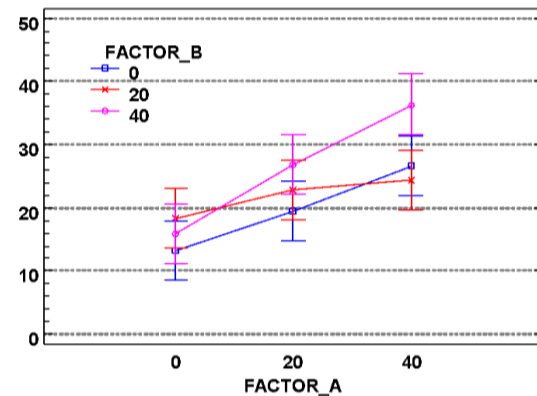


Figura 49. Efectos de interacción con medias.

De igual forma que el gráfico de medias explicado en el subcapítulo anterior tanto el gráfico de efectos principales como el gráfico de efectos de interacción convierten las medias (valores puntuales) en rangos y de esta manera se puede detectar visualmente su comportamiento y variabilidad, los gráficos de efectos de interacción no son acompañados de estos rangos por motivos gráficos pero solo son relevantes aquellos en los cuales se ha reconocido una diferencia significativa en el ANOVA multifactorial.

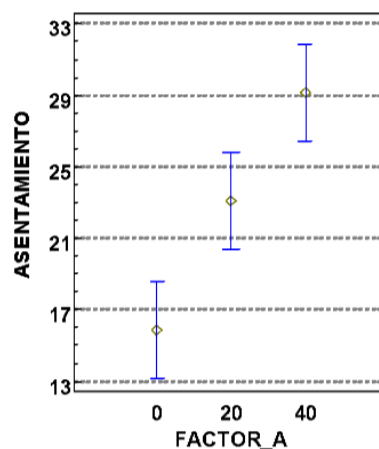
El ANOVA multifactorial estudia si las variaciones en los efectos tanto principales como de interacción son significativos, el desarrollo del método es similar al ANOVA simple con la diferencia que los tratamientos a analizar se agrupan de formas diferentes de acuerdo a qué efecto se desea analizar. Si deseamos analizar el efecto del factor A o del factor B los tratamientos son agrupados según se explicó para elaborar los gráficos de efectos principales y para analizar el efecto de interacción los tratamientos son los mismos que para el ANOVA simple, pero a la suma de cuadrados es necesario restarle la suma de cuadrados de los efectos principales.

#### 4.2.1 Asentamiento (s)

Los valores-P de la tabla del ANOVA prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que el valor-P correspondiente al efecto principal del factor A es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el asentamiento con un 95,0% de nivel de confianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
<b>A: Factor_A</b>	795.98	2	397.991	13.17	<b>0.0003</b>
B: Factor_B	203.71	2	101.853	3.37	0.0571
Interacciones					
AB	159.50	4	39.875	1.32	0.3005
Residuos	543.91	18	30.217		
Total (Corregido)	1703.10	26			

**Tabla 33.** ANOVA multifactorial del ensayo de asentamiento.



**Figura 50.** Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para el Factor A dentro del ensayo de asentamiento.

Con esta información se reconoce que a medida que el factor A (fibra Normalizada) se incrementa, el tiempo que demora el ensayo de asentamiento aumenta y las medias de los tres niveles del factor A muestran diferencias significativas, además se reconoce que en el asentamiento no muestra diferencias significativas el efecto principal del factor B (fibra no normalizada) y tampoco se reconoce diferencia significativa en el efecto de interacción.



#### 4.2.2 Velocidad de onda (m/s)

Puesto que ningún valor-P es menor que 0.05, ninguno de los factores o interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre velocidad de onda con un 5,0% de nivel de confianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
A: Factor_A	19400.00	2	9700.000	0.67	0.5262
B: Factor_B	7200.00	2	3600.000	0.25	0.7837
Interacciones					
AB	26333.30	4	6583.330	0.45	0.7699
Residuos	262333.00	18	14574.100		
Total (Corregido)	315267.00	26			

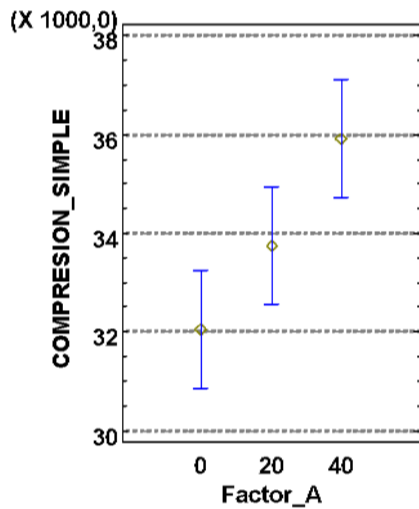
**Tabla 34.** ANOVA multifactorial de la velocidad de onda.

#### 4.2.3 Compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>)

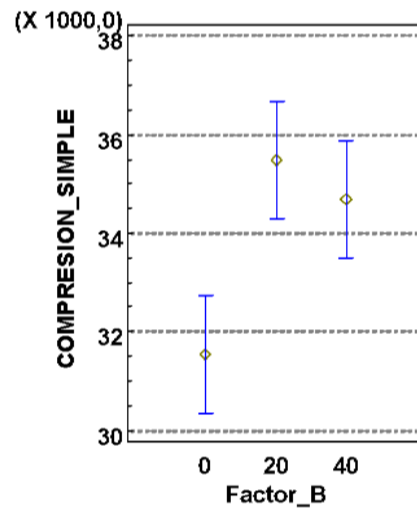
Los valores-P de la tabla del ANOVA prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que el valor-P correspondiente al efecto principal del factor A y al efecto principal del factor B es menor que 0.05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la compresión simple con un 5,0% de nivel de confianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
A: Factor_A	6.78E+07	2	3.39E+07	5.88	0.0108
B: Factor_B	7.84E+07	2	3.92E+07	6.8	0.0063
Interacciones					
AB	2.37E+07	4	5.92E+06	1.03	0.4203
Residuos	1.04E+08	18	5.77E+06		
Total (Corregido)	2.74E+07	26			

**Tabla 35.** ANOVA multifactorial del ensayo de compresión simple.



**Figura 51.** Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para el Factor A dentro del ensayo de compresión simple.



**Figura 52.** Gráfico de medias y 95.0% de Fisher LSD para el Factor B dentro del ensayo de compresión simple.

Con esta información se reconoce diferencia significativa entre el nivel -1 del factor A (0 kg/m<sup>3</sup>) con el nivel 1 del factor A (40 kg/m<sup>3</sup>) y debido a que el objetivo en la resistencia a compresión es la maximización, los mejores tratamientos están en el nivel 1 del factor A, sin embargo, no se reconoce diferencia significativa del nivel 0 del factor A (20 kg/m<sup>3</sup>) con los otros niveles. Al analizar el gráfico de efectos principales del factor B notamos que los niveles 0 (20 kg/m<sup>3</sup>) y 1 (40 kg/m<sup>3</sup>) del factor B no presentan diferencias significativas entre ellos, pero si se encuentra diferencia significativa de estos con el nivel -1 del factor B (0 kg/m<sup>3</sup>) indicando que los peores tratamientos se encuentran en el nivel -1 del factor B y que el máximo se encuentra en cualquiera de los otros dos niveles de este tratamiento.

#### 4.2.4 Módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)

Puesto que ningún valor-P es menor que 0.05, ninguno de los factores o interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el módulo de elasticidad con un 5,0% de nivel de confianza.



Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
A: Factor_A	1.29458E+9	2	6.47289E+8	0.16	0.8495
B: Factor_B	3.42664E+9	2	1.71332E+9	0.44	0.6535
Interacciones					
AB	6.94326E+9	4	1.73582E+9	0.44	0.7771
Residuos	7.07935E+10	18	3.93297E+9		
Total (Corregido)	8.2458E+10	26			

**Tabla 36.** ANOVA multifactorial del módulo de elasticidad.

#### 4.2.5 Módulo de ruptura ( $\text{kg/cm}^2$ )

Puesto que ningún valor-P es menor que 0.05, ninguno de los factores o interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el módulo de ruptura con un 5,0% de nivel de confianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
A: Factor_A	5.61572	2	2.80786	0.11	0.8967
B: Factor_B	116.951	2	58.457	2.28	0.1306
Interacciones					
AB	49.2884	4	12.3221	0.48	0.7491
Residuos	460.713	18	25.5952		
Total (Corregido)	632.569	26			

**Tabla 37.** ANOVA multifactorial del módulo de ruptura.

#### 4.2.6 Relación de Poisson

Puesto que ningún valor-P es menor que 0.05, ninguno de los factores o interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la relación de Poisson con un 5,0% de nivel de confianza.



Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
A: Factor_A	8.67E-05	2	4.34E-05	0.04	0.9641
B: Factor_B	8.00E-04	2	4.00E-04	0.34	0.7179
Interacciones					
AB	2.62E-03	4	6.56E-04	0.55	0.6989
Residuos	2.13E-02	18	1.18E-03		
Total (Corregido)	2.48E-02	26			

**Tabla 38.** ANOVA multifactorial de la velocidad de onda.

### 4.3 Modelos de regresión y gráficos de superficie

Un modelo permite ajustar los datos experimentales a una expresión matemática que represente el fenómeno estudiado y de esta manera predecir el valor de la variable respuesta con cualquier combinación de niveles de los factores siempre que estos se encuentren dentro de la región experimental y mediante esta expresión matemática es posible modelar el fenómeno en forma de gráficos de superficie.

El modelo de regresión lineal múltiple con k variables independientes es el polinomio:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (\text{EC. 30})$$

Donde:

$\beta_i$ : Coeficientes de regresión

$X_i$ : Niveles y combinación de niveles de los factores

Para nuestros modelos se utilizará hasta los efectos cuadráticos de dos factores por tanto el modelo de la regresión lineal múltiple queda expresado:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \varepsilon \quad (\text{EC. 31})$$

El procedimiento para encontrar cada uno de los coeficientes se basa en la reducción del error, se utiliza el procedimiento de mínimos cuadrados, con lo que:

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ji})^2 \quad (\text{EC. 32})$$

Derivando para obtener el mínimo error igualando a 0 y colocando en notación matricial el vector de coeficientes  $B$  se encuentra mediante:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (\text{EC. 33})$$

Donde:

$\hat{\boldsymbol{\beta}}$ : Vector de coeficientes

$\mathbf{X}$ : Matriz de niveles de factores

$\mathbf{X}'$ : Transpuesta de  $\mathbf{X}$

$\mathbf{y}$ : Vector de resultados

Una vez determinados los coeficientes de regresión el modelo es graficado, se debe tener en cuenta que los gráficos obtenidos pueden o no representar el fenómeno de manera exacta por esto es necesario realizar los análisis previos y de esta manera asegurarnos de llegar a conclusiones que reflejen la realidad de los fenómenos estudiados. La calidad del ajuste puede ser verificada mediante los estadísticos  $R^2$  y  $R^2_{\text{ajustado}}$  estos estadísticos indican como el modelo se ajusta a la variabilidad de la variable respuesta y se consideran buenos resultados cuando estos estadísticos tienen valores semejantes al 100%, valores bajos de los estadísticos pueden ser debido a (Gutiérrez Pulido, 2008):

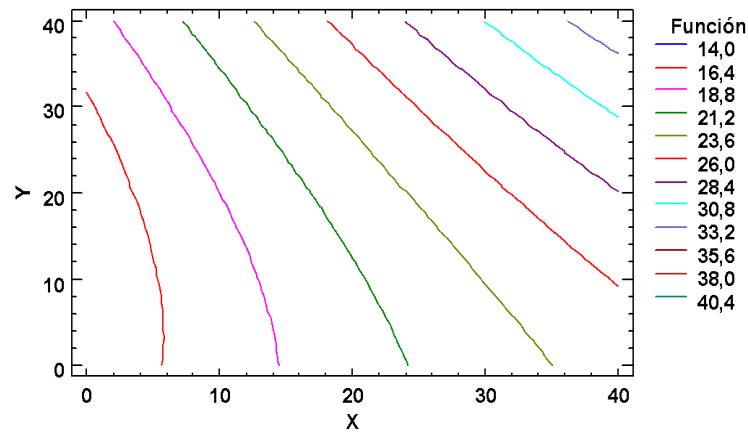




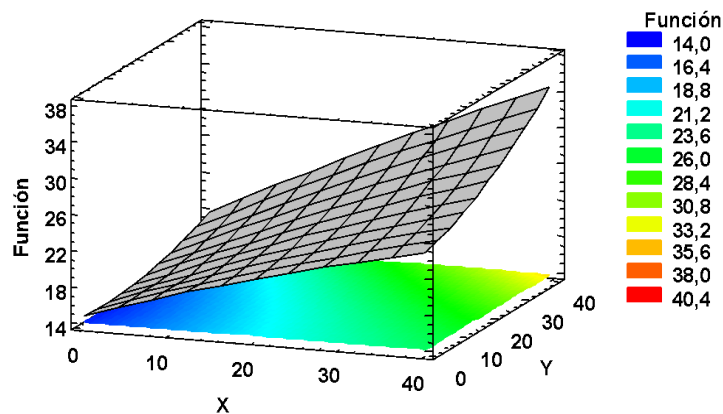
- a) Los factores analizados no tienen la suficiente influencia en la variable respuesta.
- b) Los niveles de los factores estudiados son demasiado pequeños por lo que la variación de la variable respuesta es muy pequeña.
- c) No se consideraron ni controlaron adecuadamente otros factores a los analizados y estos producen mucha variación en el resultado del experimento.
- d) Los errores experimentales fueron altos.

Se presenta a continuación los resultados de las regresiones y los gráficos de superficie del asentamiento y resistencia a compresión ya que solo estos en el ANOVA multifactorial llegaron a mostrar significancia en los efectos analizados.

### 4.3.1 Asentamiento



Modelo:  $14.7453 + (0.300903 \cdot x) - (0.0460139 \cdot y) - (0.00138333 \cdot x \cdot x) + (0.00309583 \cdot y \cdot y) + (0.00432708 \cdot x \cdot y)$

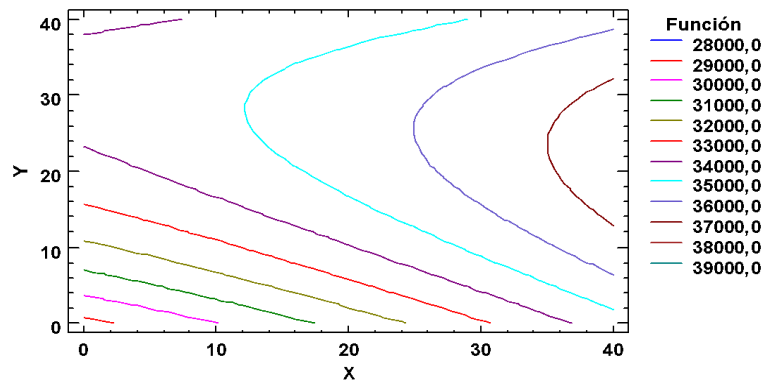


**Figura 53.** Gráfico de superficie del modelo de regresión para el ensayo de asentamiento (X: fibra normalizada en kg/m<sup>3</sup>, Y: fibra no normalizada en kg/m<sup>3</sup>).

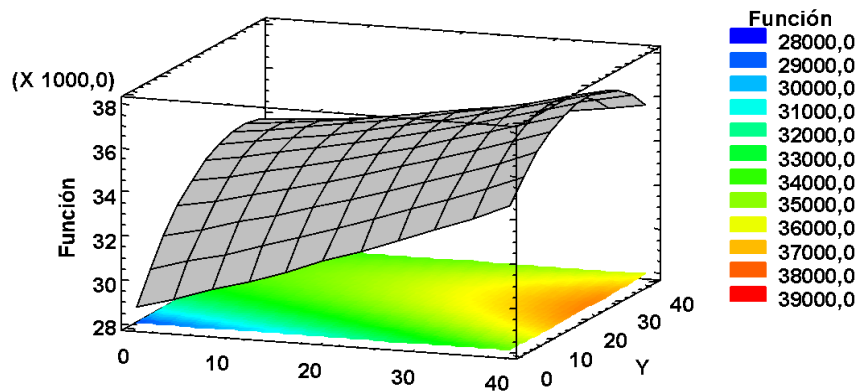
$$R^2=60.8\%; R^2_{ajus}=51.48\%$$

La región experimental contempla el punto más bajo de inclusión de fibras en 0%, según el grafico de isolineas el punto óptimo se encuentra a la derecha del tratamiento base (0% fibras) siendo imposible ampliar la región experimental con un contenido negativo de fibras.

### 4.3.2 Compresión simple



Modelo:  $(28729,1) + (119,137 \cdot x) + (365,049 \cdot y) + (0,646736 \cdot x \cdot x) - (5,95806 \cdot y \cdot y) - (2,41135 \cdot x \cdot y)$



**Figura 54.** Gráfico de superficie del modelo de regresión para el ensayo de compresión simple. (X: fibra normalizada en kg/m3, Y: fibra no normalizada en kg/m3).

$$R^2=57.5\%; R^2_{ajus}=47.39\%$$

Los gráficos de superficie muestran como el mejor punto dentro del espacio experimental es aquel con una combinación 40 kg/m3 fibra normalizada y 20 kg/m3 fibra no normalizada, pero no es el punto óptimo ya que este se encuentra con una cantidad mayor de fibra normalizada, y por tanto el siguiente paso a seguir es aumentar un nivel al experimento y seguir la metodología de superficie de respuesta.



## CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Asentamiento

- No se ha podido identificar una combinación óptima de inclusión de fibras que produzca una minimización en el tiempo de ensayo de asentamiento.
- La media más baja corresponde al tratamiento 1 y según el ANOVA simple este tratamiento es mejor que los tratamientos 3, 5, 6, 8, 9. Pero con el mismo análisis no se encuentra diferencia significativa con los tratamientos 2,4 y 7 por lo que se puede asegurar que una inclusión de fibras de hasta 20 kg/m<sup>3</sup> de fibra normalizada no influye en el asentamiento siempre que no se incluya otro tipo de fibra.
- En el análisis de varianza simple el tratamiento 9 es estadísticamente diferente al resto de tratamientos, este tratamiento se caracteriza por ser el que alcanza los 50 cm de diámetro en el ensayo de asentamiento en el mayor tiempo. Es lógico el resultado obtenido debido a que es el tratamiento que mayor cantidad de fibras posee, el tratamiento 9 corresponde a la inclusión de 40 kg/m<sup>3</sup> de fibra normalizada y 40 kg/m<sup>3</sup> de fibra no normalizada.
- Según el ANOVA multifactorial solo se reconoce el efecto principal de la fibra normalizada, identificándose que a mayor cantidad de fibra mayor tiempo en el ensayo de asentamiento además se reconoce que este efecto es independiente de la cantidad de fibra no normalizada incluida en el hormigón.
- Se obtiene un modelo matemático que representa el asentamiento según la cantidad y el tipo de fibras incluidas, para este modelo los estadísticos que indican la calidad del ajuste son de:  $R=60.8\%$ , este porcentaje no es suficiente para realizar una predicción del asentamiento con cualquier combinación de fibras, sin embargo, se puede utilizar para entender cómo se comporta el asentamiento en la región experimental. La baja calidad del ajuste se debe a que los errores experimentales fueron altos debido a que los materiales usados en el ensayo están desgastados o en mal estado.



## 5.2 Velocidad de onda

- No se ha podido identificar una combinación óptima de inclusión de fibras que produzca una minimización en el módulo elástico obtenido a partir de la velocidad de onda.
- Según el ANOVA simple no se detecta una diferencia estadísticamente significativa entre la velocidad de onda medida en los tratamientos, según el ANOVA multifactorial no se detecta una diferencia estadísticamente significativa entre los efectos que produce la inclusión de fibras
- La inclusión de fibras no afecta la cohesión del hormigón y debido a esto no se aumenta o disminuye significativamente la velocidad de onda respecto a la mezcla base.

## 5.3 Compresión simple

- No se ha podido identificar una combinación óptima de inclusión de fibras que produce una maximización en la resistencia a la compresión simple.
- La media más baja corresponde al tratamiento 1 y según el ANOVA simple este tratamiento es diferente a todos excepto al tratamiento 2. No se puede asegurar que el tratamiento 2 es diferente al tratamiento 1 sin embargo es probable que este supere al tratamiento 1. Por tanto, se puede concluir que la inclusión de fibras en cualquier nivel del espacio experimental aumenta la resistencia a la compresión.
- Según el ANOVA multifactorial se reconoce el efecto principal de los dos factores, el incremento de la cantidad de fibra de cualquier tipo incrementa la resistencia a la compresión, esto apoya los resultados obtenidos en el ANOVA simple.
- Se obtiene un modelo matemático que representa la resistencia a la compresión según la cantidad y el tipo de fibras incluidas, para este modelo los estadísticos que indican la calidad del ajuste son de:  $R=57.5\%$ , este porcentaje no es suficiente para realizar una predicción de la resistencia a la compresión con cualquier combinación de fibras, sin embargo, se puede utilizar para entender cómo se comporta la resistencia



a la compresión en la región experimental. La baja calidad del ajuste se debe a que los factores analizados no tienen la suficiente influencia en la variable respuesta. Sería conveniente ampliar la región experimental ya que se observa en el gráfico de tres dimensiones que el punto óptimo se encuentra con una cantidad de inclusión mayor de fibras normalizada y con 20 kg/m<sup>3</sup> de fibra no normalizada.

#### 5.4 Módulo de elasticidad

- No se ha podido identificar una combinación óptima de inclusión de fibras que produce una minimización en el módulo elástico obtenido a partir de métodos mecánicos.
- Según el ANOVA simple no se detecta una diferencia estadísticamente significativa entre el módulo de elasticidad medido en los tratamientos y se identifica una gran variabilidad en los datos, según el ANOVA multifactorial no se detecta una diferencia estadísticamente significativa entre los efectos que produce la inclusión de fibras, esto probablemente se debe a que los niveles de los factores estudiados son pequeños por lo que la variación de la variable respuesta es muy pequeña en contraposición con la variación propia de cada tratamiento. Además, los errores experimentales son grandes debido a los equipos utilizados.
- El módulo de elasticidad al igual que otras propiedades mecánicas son determinadas mediante equipos los cuales deben estar calibrados de manera adecuada ya que como se puede observar en los resultados de este proyecto se detectó diferencia entre los resultados obtenidos en diferentes laboratorios. En LABSCON utilizan un compresómetro que consta de dos deformímetros, uno en cada costado, esto ayuda a controlar que toda la sección se encuentre en compresión ya que errores de capeo o desvíos en las rotulas de los discos que transmiten la compresión en las prensas pueden ocasionar que no toda la sección transversal del espécimen se encuentre en compresión, este tipo de errores no es posible identificarlo con el equipo del laboratorio de materiales de construcción de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca. Al no poder utilizar el compresómetro de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca por ser imposible tomar las lecturas ya que se producen saltos en el deformímetro, se optó por medir

las deformaciones colocando el deformímetro en la mesa de la prensa como se puede observar en la figura 27 esto causo que las deformaciones medidas correspondan a los cilindros, componentes de la mesa y asentamientos propios del sistema de carga. La velocidad de carga es otro de los factores importantes a tener en cuenta, la norma indica que la velocidad de carga debe estar dentro del rango  $0.25 \pm 0.05 \text{ MPa/s}$  y en base a esto se realizó el ensayo en LABSCON, por el contrario en el laboratorio de materiales de construcción de la Facultad de Ingeniería es imposible controlar esta velocidad de ensayo y esto no solo afecta a la determinación del módulo de elasticidad y relación de Poisson, sino que imposibilitó la determinación de la resistencia a compresión y fue necesario realizar este ensayo en el laboratorio de la Facultad de Arquitectura.

### 5.5 Módulo de ruptura

- No existe una combinación óptima de inclusión de fibras que produce una maximización del módulo de ruptura.
- Según el ANOVA simple no se detecta una diferencia estadísticamente significativa entre la velocidad de onda medida en los tratamientos y se identifica una gran variabilidad en los datos, según el ANOVA multifactorial no se detecta una diferencia estadísticamente significativa entre los efectos que produce la inclusión de fibras, esto probablemente se debe a que los niveles de los factores estudiados son pequeños por lo que la variación de la variable respuesta es muy pequeña en contraposición con la variación propia de cada tratamiento. La resistencia al agrietamiento de tensión por flexión (módulo de ruptura) no varía significativamente debido a que las fibras no comienzan a trabajar sino hasta que el hormigón se ha fisurado entiéndase al final del ensayo.
- Se reconoce una variación en el tipo de falla en el ensayo, ya que en aquellos hormigones reforzados con fibras solo se produce un agrietamiento a diferencia de los hormigones no reforzados donde se produce una separación completa de las partes. Una vez que se llega a la carga máxima el hormigón se agrieta, pero las fibras presentes no permiten la destrucción total de la vigueta puesto que estas comienzan a trabajar a tracción.



## 5.6 Relación de Poisson

- No se ha podido identificar una combinación óptima de inclusión de fibras que produce una maximización en la relación de Poisson
- Según el ANOVA simple no se detecta una diferencia estadísticamente significativa entre la relación de Poisson medida en los tratamientos y se identifica una gran variabilidad en los datos, según el ANOVA multifactorial no se detecta una diferencia estadísticamente significativa entre los efectos que produce la inclusión de fibras, esto probablemente se debe a que los niveles de los factores estudiados son demasiado pequeños por lo que la variación de la variable respuesta es muy pequeña en contraposición con la variación propia de cada tratamiento. Además, los errores experimentales son grandes debido a los equipos utilizados.
- Al igual que el módulo de elasticidad los resultados de la relación de Poisson no son los esperados, pero en la ciudad de Cuenca no existe ningún laboratorio con el cual se pueda validar u obtener un coeficiente de corrección para esta propiedad, incluso se contactó con INECYC a fin de realizar este ensayo y tampoco contaban con el equipo necesario. La obtención de la relación de Poisson está ligada al módulo elástico por que comparte un proceso semejante por tanto se recomienda mejorar los equipos (compresómetro, extensómetro, prensa) a fin de poder realizar ensayos de calidad al servicio de investigadores y profesionales de la región.





## BIBLIOGRAFÍA

- ACI 544.5R. Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete (2010).
- ASTM C 127. (2004). Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Gruesos.
- ASTM C 128. Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Finos (2004).
- ASTM C 136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (2014).
- ASTM C 1611. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete (2014).
- ASTM C 215. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens (2014).
- ASTM C 33. (2016). Especificación Normalizada para Agregados para Concreto.
- ASTM C 39. Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto (2016).
- ASTM C 469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (2014).
- ASTM C 494. Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Concreto (2008).
- ASTM C 566. Método de Ensayo Normalizado para Medir el Contenido Total de Humedad Evaporable en Agregados Mediante Secado (2004).
- ASTM C 617. Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens (2015).
- ASTM C 78. Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto (Utilizando Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro) (2002).
- Bernard, O., & MENSING, R. W. (1975). Statistics in research.
- Cañizares, I. G. (2012). *Diseño de mezclas de hormigón autocompactante utilizando materiales de la zona.*
- Committee, A. C. I., Institute, A. C., & Standardization, I. O. for. (2008). Building



code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. CONF, American Concrete Institute.

Córdoba, C., Mera, J., Martínez, D., & Rodríguez, J. (2010). Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad, reforzados con fibra vegetal, Tetera (*Stromanthe Stromathoides*). *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(7), 417–427.

de Villanueva, L. (2004). Evolución histórica de la construcción con yeso. *Informes de La Construcción*.

Fernández Canovas, M. (2007). *Hormigón*.

Gutiérrez Pulido, H. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*.

Julián, C., Giovanni, G., & Aperador, W. (2013). Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. *Ingeniería Investigación Y Tecnología*, (número 3), 16.

Kuehl, R. O. (2001). *Diseño de experimentos: Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones*.

Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2009). *Materiales para ingeniería civil*.

Mendoza, C. J., Aire, C., & Dávila, P. (2011). Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plásticos y endurecido. *Concreto Y Cemento. Investigación Y Desarrollo*, 2(2), 35–47.

Menéndez, G., Bonavetti, V. L., & Irassar, E. F. (2008). Los Diseños de Experimentos y la Tecnología del Hormigón, 94–104.

Miravete, A. (1995). *Los Nuevos Materiales En La Construcción* (Reverté).

Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley.

Napolitano, H. (2010). *Diseño de Experimentos*.

NTE INEN 0872. Áridos para hormigón (2011).

NTE INEN 2380. Cementos hidráulicos. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos (2011).

Pardo, A., Garrido, J., Ruiz, M. Á., & San Martín, R. (2007). La interacción entre factores en el análisis de varianza : errores de interpretación, 19(1).

Vélez Guayasamín, A. S. (2013). *Hormigones con escoria de acero de horno eléctrico: prestaciones mecánicas, físicas y químicas*.



## ANEXOS



Universidad de Cuenca  
Facultad de Ingeniería

### Laboratorio de Sanitaria Análisis Microscópico

**Proyecto:** Evaluación de las propiedades mecánicas en hormigones de alta resistencia autocompactantes reforzados con fibras metálicas normalizadas y fibras metálicas no normalizadas.

**Muestra:** Fibra No Normalizada – Limalla

**Ubicación:** Cuenca – Azuay

**Solicitado por:** Julio Jurado – Diego Guamán

**Fecha:** 05 – Octubre – 2016

#### Equipo:

- **Microscopio:** Nikon Eclipse Ti
- **Cámara:** Nikon DS-QI2
- **Software:** NIS-Elements Basic Research
- **Lente:** Nikon Plan Fluor 10x / 0.30

#### Descripción del análisis:

Obtención del largo y ancho de una muestra de 50 fibras mediante la obtención de una imagen compuesta de visión óptica avanzada con campo óptico de 2.5 para mayor alcance y una matriz de 6x6, la muestra ha sido observada en 3 medios distintos: directa, en agua y tapada con lente.

#### Resultados:

Muestra	Largo mm	Ancho mm						
1	0.689	0.167	17	0.349	0.213	35	0.071	0.065
2	0.554	0.177	18	0.549	0.402	36	0.064	0.049
3	1.172	0.174	19	0.793	0.259	37	1.430	0.176
4	1.587	0.208	20	0.072	0.040	38	0.076	0.031
5	0.386	0.127	21	0.327	0.191	39	0.082	0.050
6	0.899	0.132	22	0.396	0.107	40	0.065	0.060
7	0.384	0.169	23	0.965	0.265	41	0.036	0.032
8	0.316	0.247	24	1.691	0.356	42	0.047	0.031
9	0.351	0.232	25	0.284	0.185	43	0.059	0.026
10	0.401	0.358	26	0.541	0.138	44	0.334	0.204
11	0.337	0.278	27	0.283	0.232	45	0.242	0.039
12	1.728	0.159	28	0.376	0.224	46	0.063	0.044
13	0.422	0.314	29	0.258	0.209	47	0.029	0.026
14	0.197	0.162	30	0.082	0.040	48	0.101	0.034
15	2.601	0.239	31	0.052	0.036	49	0.047	0.038
16	0.510	0.312	32	0.075	0.036	50	0.057	0.041
			33	0.074	0.030			
			34	0.048	0.037			



**Registro Fotográfico:**

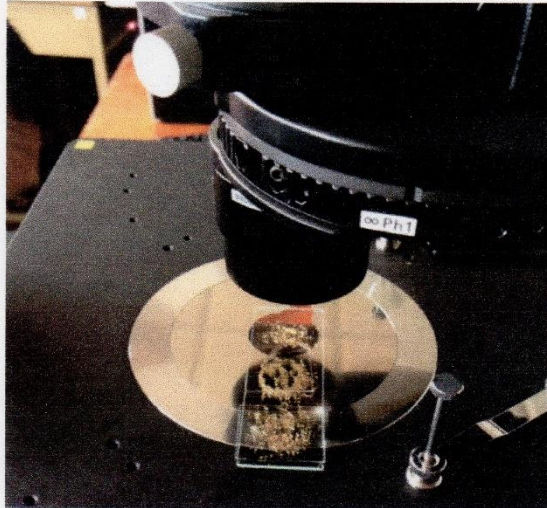


Imagen 1: Análisis microscópico de la muestra en tres medios



Imagen 2: Imagen compuesta de visión óptica avanzada



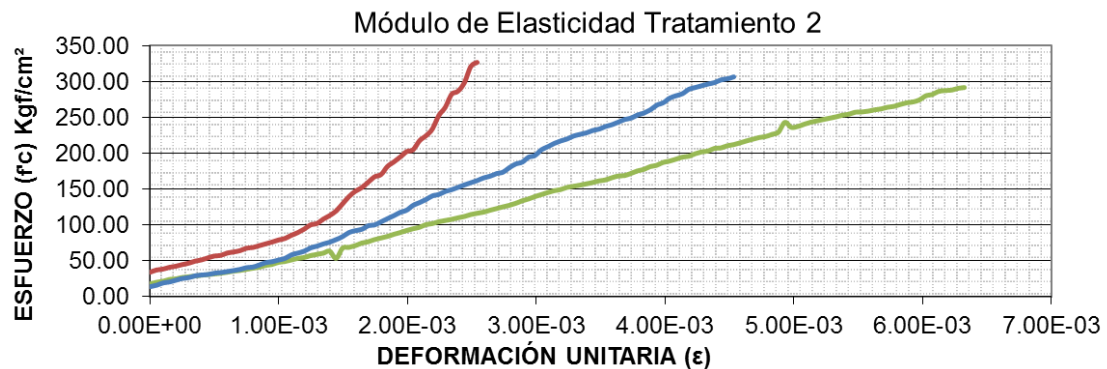
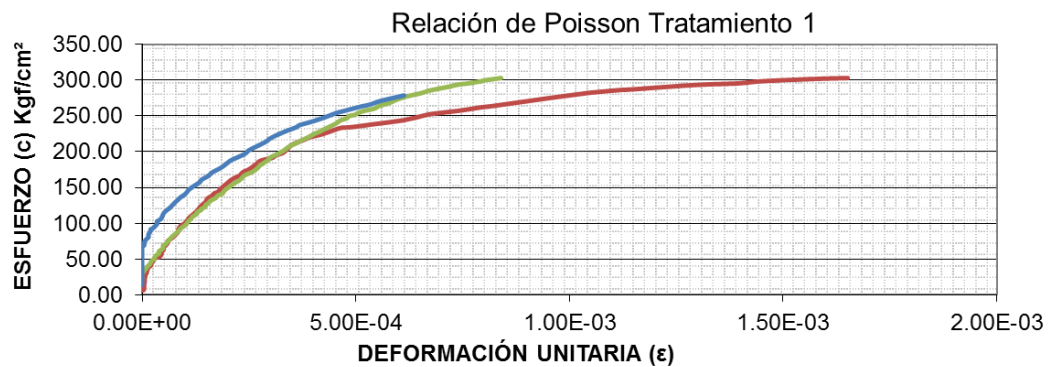
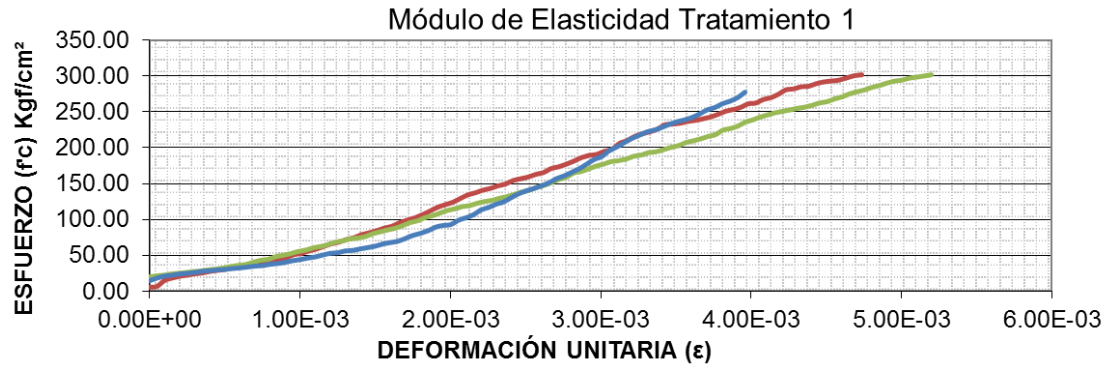
Imagen 3: Contraste de Textura

Ing. Esteban Sánchez  
Técnico principal

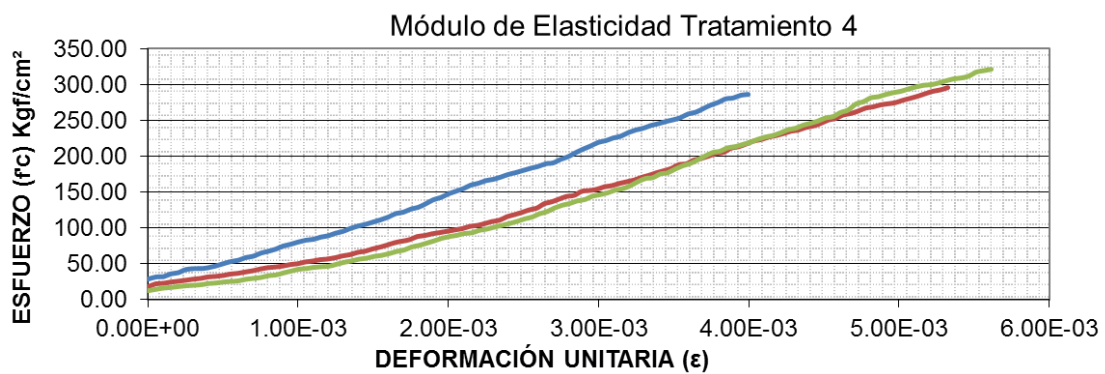
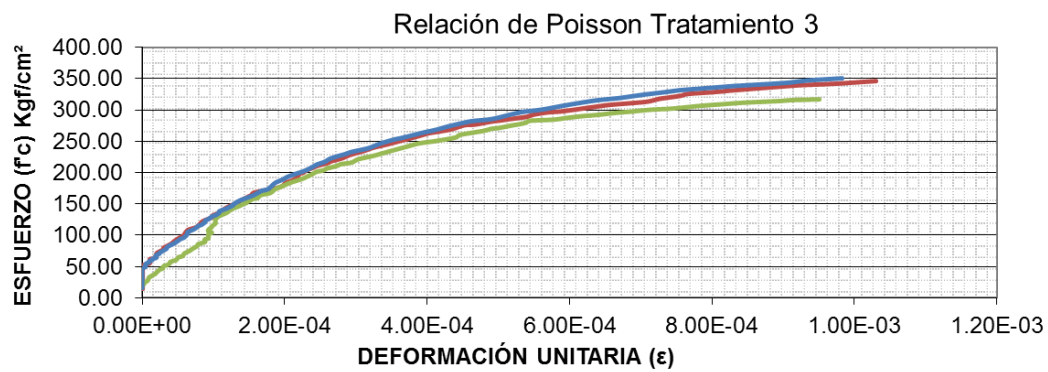
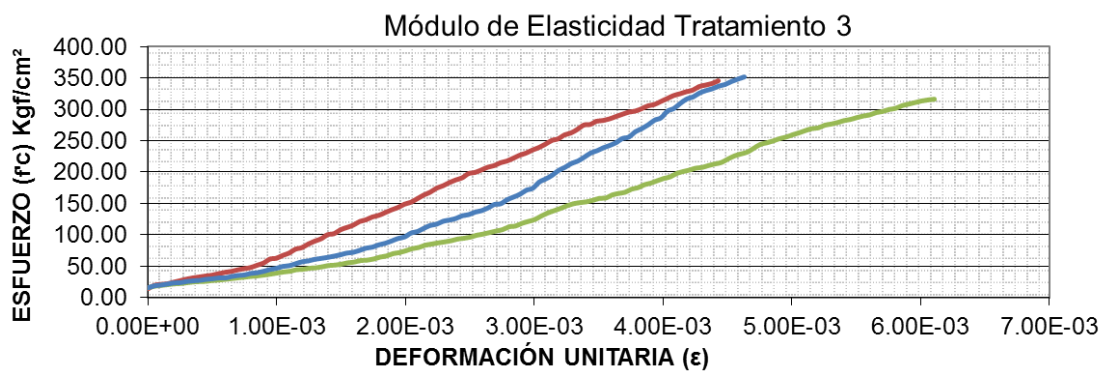
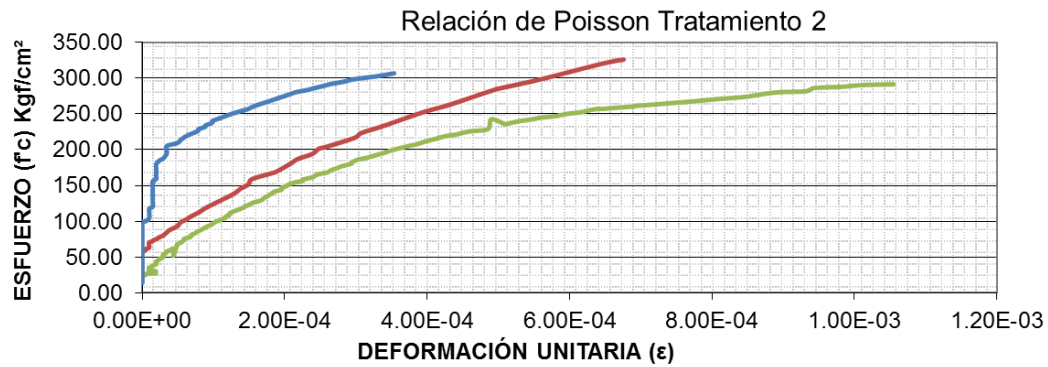
Ing. Andrés Alvarado. PhD.  
Docente de la Facultad de Ingeniería

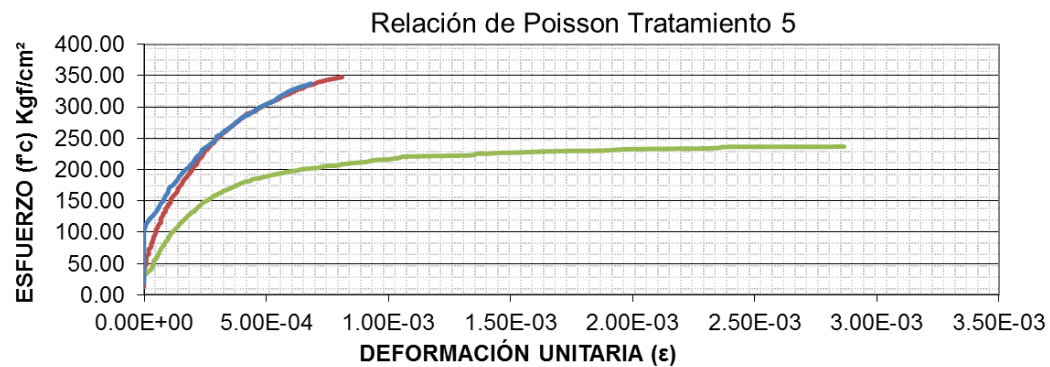
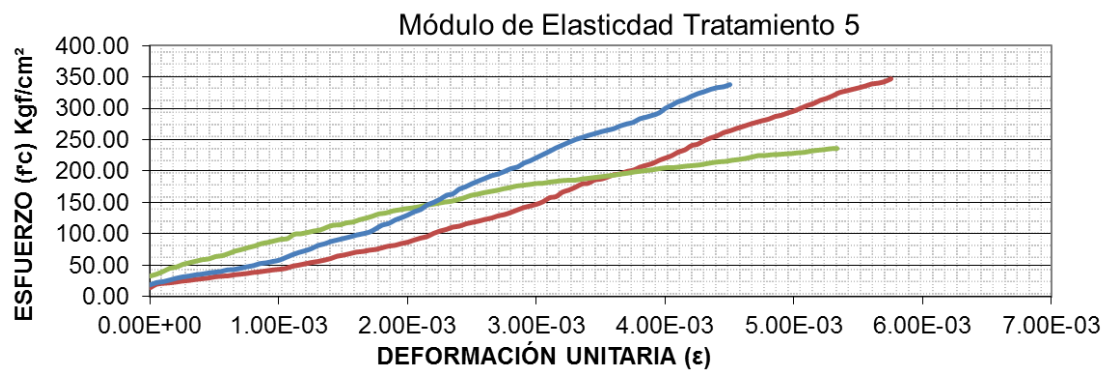
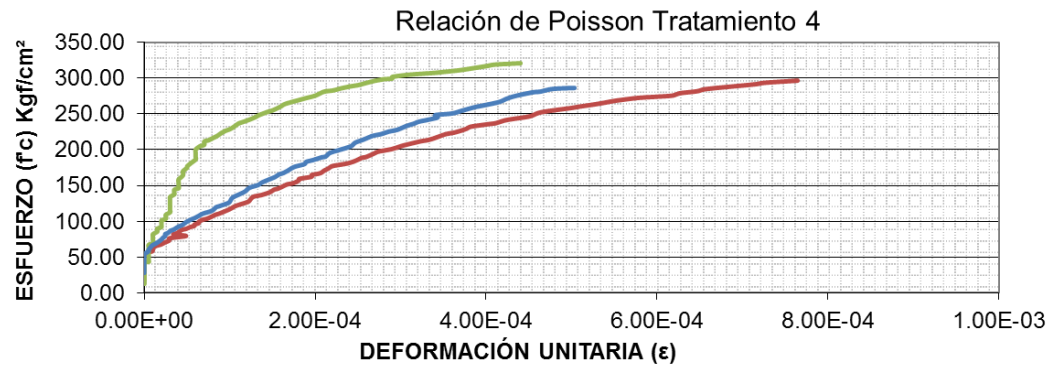
### Graficas Esfuerzo/Deformación

En cada grafica se representan los datos obtenidos para cada repetición del tratamiento.





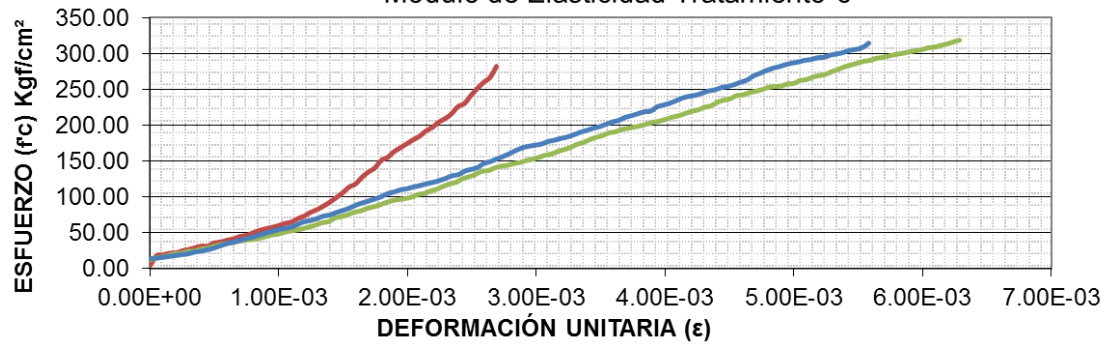




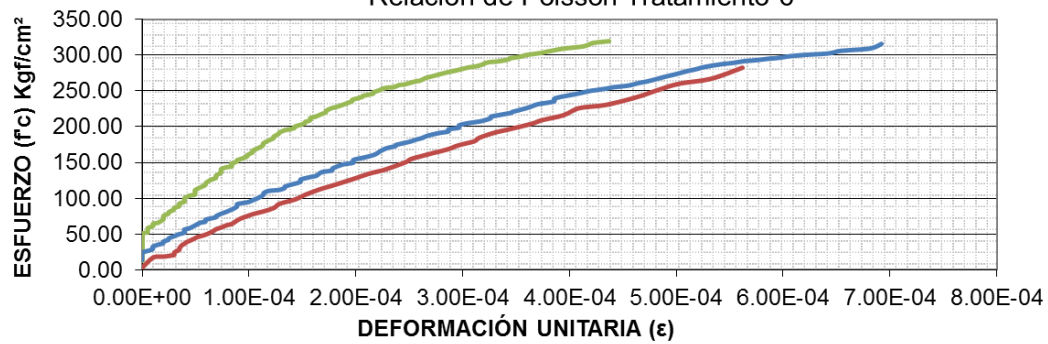




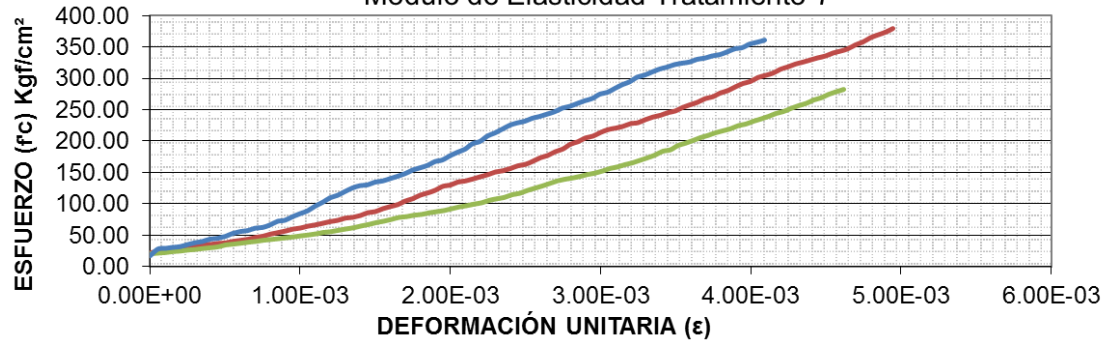
Módulo de Elasticidad Tratamiento 6

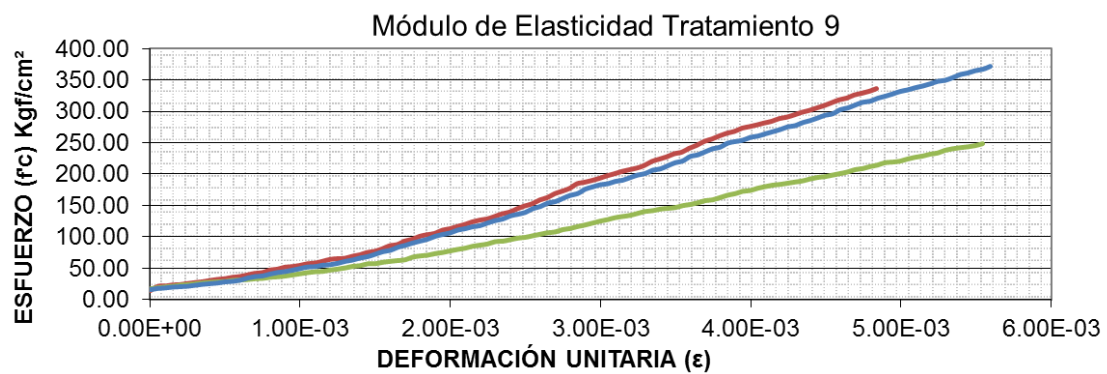
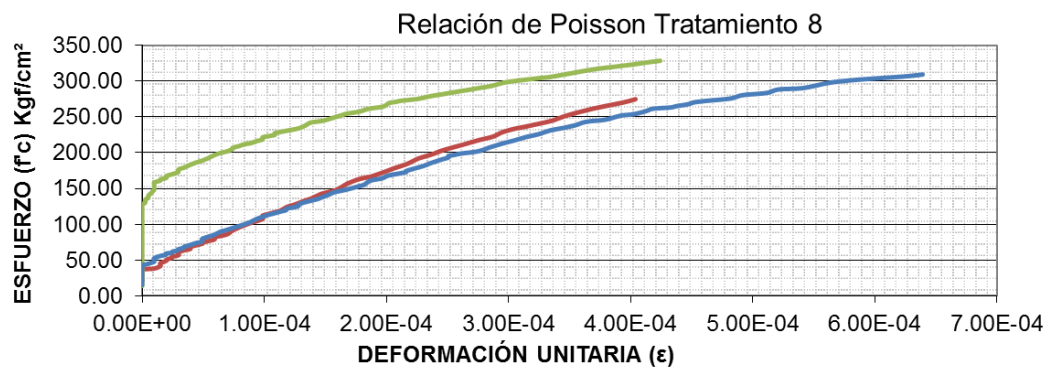
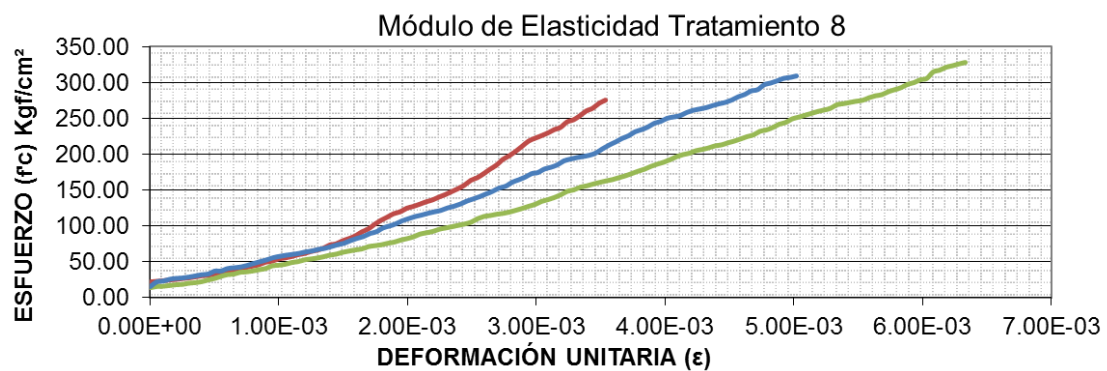
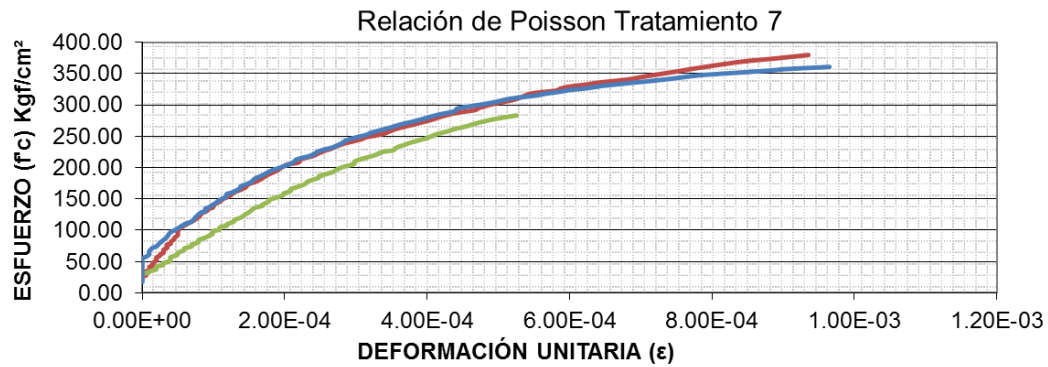


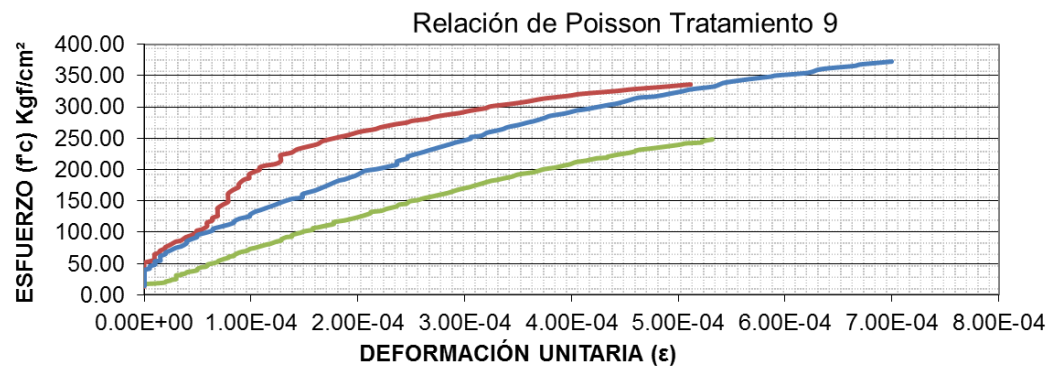
Relación de Poisson Tratamiento 6




Módulo de Elasticidad Tratamiento 7









**LABSCON**  
Laboratorio de Suelos y Concretos  
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

**PROYECTO:** TESIS UNIVERSIDAD DE CUENCA

**NORMA:** ASTM C 469-02

**SOLICITA:** Jose Abad, Diego Guaman, Julio Jurado, Jorge Romero

**PROBETA # :** 4

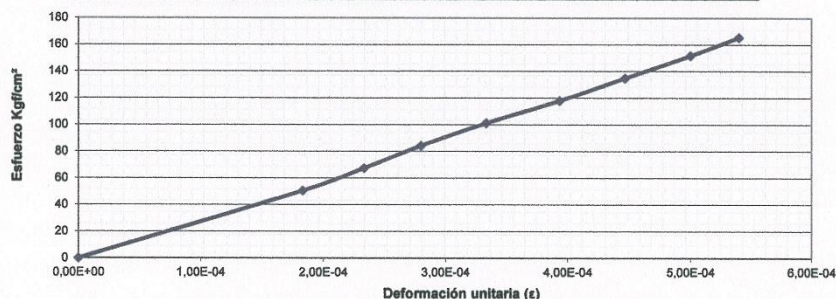
**FECHA:** 11 DE OCTUBRE DEL 2016

**EDAD:** 28 DIAS

### MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

Características de la probeta:					
Diámetro Probeta	15,05	cm	Carga Máxima	79578,00	Kgf
Altura Probeta	29,00	cm	Carga Máxima	780,39	KN
Area Probeta	177,90	cm <sup>2</sup>	Resistencia Máxima	43,87	Mpa
Longitud Inicial L <sub>0</sub>	15,00	cm	Resistencia Máxima	447,33	Kgf/cm <sup>2</sup>

Aplicaciones de carga					
LECURA DEFORMIMETRO (x0.001 mm)	CARGA (Kgf)	CARGA (KN)	ESFUERZO (MPa)	ESFUERZO (Kgf/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACION UNITARIA LONGITUDINAL
0	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00E+00
28	9000,00	88,26	4,981	50,59	1,83E-04
35	12000,00	117,68	6,615	67,46	2,33E-04
42	15000,00	147,10	8,269	84,32	2,80E-04
50	18000,00	176,52	9,923	101,18	3,33E-04
59	21000,00	205,94	11,577	118,05	3,93E-04
67	24000,00	235,36	13,230	134,91	4,47E-04
75	27000,00	264,78	14,884	151,77	5,00E-04
81	29413,00	288,44	16,214	165,34	5,40E-04




Resumen de datos	
<u>Esfuerzo a 50 millonésimas de deformación</u>	
S <sub>1</sub> =	13,80 Kgf/cm <sup>2</sup>
<u>Esfuerzo al 40% de la Resistencia</u>	
S <sub>2</sub> =	165,34 Kgf/cm <sup>2</sup>
<u>Deformación Unitaria Longitudinal por S<sub>2</sub></u>	
ξ <sub>1</sub> =	5,40E-04

MODULO DE ELASTICIDAD	
E=	309.263,36 Kgf/cm <sup>2</sup>



Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-0710  
Cuenca - Ecuador / Email: labscon@outlook.com





**LABSCON**  
Laboratorio de Suelos y Concretos  
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

**PROYECTO:** TESIS UNIVERSIDAD DE CUENCA

**NORMA:** ASTM C 469-02

**SOLICITA:** Jose Abad, Diego Guaman, Julio Jurado, Jorge Romero

**PROBETA # :** 5

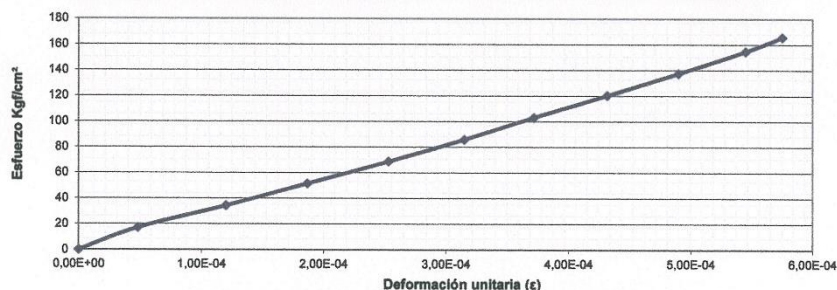
**FECHA:** 11 DE OCTUBRE DEL 2016

**EDAD:** 28 DIAS

### MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

Características de la probeta:					
Diámetro Probeta	15,05	cm	Carga Máxima	88083,00	Kgf
Altura Probeta	30,00	cm	Carga Máxima	863,80	KN
Area Probeta	177,90	cm <sup>2</sup>	Resistencia Máxima	48,56	Mpa
Longitud Inicial L <sub>0</sub>	15,00	cm	Resistencia Máxima	495,14	Kgf/cm <sup>2</sup>

Aplicaciones de carga					
LECURA DEFORMIMETRO (x0.001 mm)	CARGA (Kgf)	CARGA (KN)	ESFUERZO MPa	ESFUERZO (Kgf/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACION UNITARIA LONGITUDINAL
0	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00E+00
7	3059,15	30,00	1,686	17,20	4,83E-05
18	6118,30	60,00	3,373	34,39	1,20E-04
28	9177,45	90,00	5,059	51,59	1,87E-04
38	12236,59	120,00	6,746	68,79	2,53E-04
47	15295,74	150,00	8,432	85,98	3,15E-04
56	18354,89	180,00	10,118	103,18	3,72E-04
65	21414,04	210,00	11,805	120,37	4,32E-04
74	24473,19	240,00	13,491	137,57	4,90E-04
82	27532,34	270,00	15,178	154,77	5,46E-04
86	29478,98	289,09	16,251	165,71	5,75E-04




Resumen de datos	
Esfuerzo a 50 millonésimas de deformación	
S <sub>1</sub> =	18,02 Kgf/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo al 40% de la Resistencia	
S <sub>2</sub> =	165,71 Kgf/cm <sup>2</sup>
Deformación Unitaria Longitudinal por S <sub>2</sub>	
ε <sub>1</sub> =	5,75E-04

MODULO DE ELASTICIDAD	
E =	281.314,13 Kgf/cm <sup>2</sup>

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-07  
Cuenca - Ecuador / Email: labscon@outlook.com

  
**LABSCON**  
Laboratorio de Suelos y Concretos  
Diseño Control de Calidad y Fiscalización  
Ing. Pablo Esteban Vélez Dávila



**LABSCON**  
Laboratorio de Suelos y Concretos  
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: TESIS UNIVERSIDAD DE CUENCA

NORMA: ASTM C 469-02

SOLICITA: Jose Abad, Diego Guaman, Julio Jurado, Jorge Romero

PROBETA # : 6

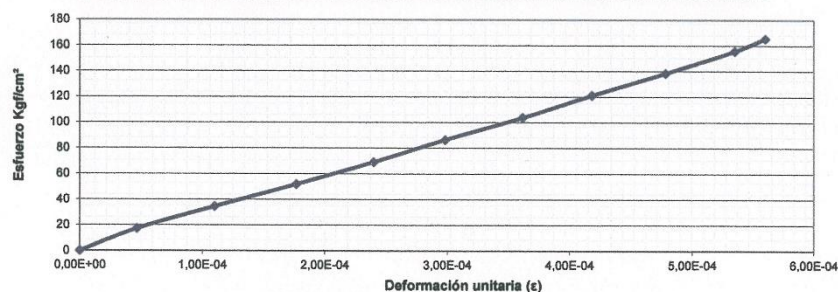
FECHA: 11 DE OCTUBRE DEL 2016

EDAD: 28 DIAS

### MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

Características de la probeta:					
Diámetro Probeta	15,00	cm	Carga Máxima	87640,00	Kgf
Altura Probeta	29,00	cm	Carga Máxima	859,45	KN
Area Probeta	176,72	cm <sup>2</sup>	Resistencia Máxima	48,64	Mpa
Longitud Inicial L <sub>0</sub>	15,00	cm	Resistencia Máxima	495,94	Kgf/cm <sup>2</sup>

Aplicaciones de carga					
LECURA DEFORMÍMETRO (x0.001 mm)	CARGA (Kgf)	CARGA (KN)	ESFUERZO MPa	ESFUERZO (Kgf/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACIÓN UNITARIA LONGITUDINAL
0	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00E+00
7	3059,15	30,00	1,698	17,31	4,67E-05
17	6118,30	60,00	3,395	34,62	1,10E-04
27	9177,45	90,00	5,093	51,93	1,77E-04
36	12236,59	120,00	6,791	69,24	2,40E-04
45	15295,74	150,00	8,488	86,56	2,98E-04
54	18354,89	180,00	10,186	103,87	3,62E-04
63	21414,04	210,00	11,884	121,18	4,18E-04
72	24473,19	240,00	13,581	138,49	4,78E-04
80	27532,34	270,00	15,279	155,80	5,35E-04
84	29246,48	286,81	16,230	165,50	5,60E-04



Resumen de datos	
Esfuerzo a 50 millonésimas de deformación	
S <sub>1</sub> =	18,22 Kgf/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo al 40% de la Resistencia	
S <sub>2</sub> =	165,50 Kgf/cm <sup>2</sup>
Deformación Unitaria Longitudinal por S <sub>2</sub>	
ξ <sub>1</sub> =	5,60E-04

MODULO DE ELASTICIDAD	
E =	288.785,96 Kgf/cm <sup>2</sup>

  
 Laboratorio de Suelos y Concretos  
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización  
 Ing. Pablo Esteban Vélez Dávila

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070  
Cuenca - Ecuador / Email: labscon@outlook.com

Hoja Técnica  
Edición N°3 06-2012  
Identificación N° 92735  
Versión - 01  
SikaFiber CHO 65/35 NB

## SikaFiber® CHO 65/35 NB

Fibra de acero para el refuerzo del hormigón normal  
y hormigón proyectado

<b>Descripción</b>	SikaFiber CHO 65/35 NB son fibras de acero trefilado de alta calidad para reforzamiento del hormigón tradicional y hormigón proyectado (shotcrete) especialmente encoladas (pegadas) para facilitar la homogenización en el hormigón, evitando la aglomeración de las fibras individuales. SikaFiber CHO 65/35 NB son fibras de acero de alta relación longitud/diámetro (l/d) lo que permite un alto rendimiento con menor cantidad de fibra.	
<b>Usos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ SikaFiber CHO 65/35 NB, otorga una alta capacidad de soporte al hormigón en un amplio rango de aplicaciones y especialmente hormigón proyectado (shotcrete) reduciendo tiempo y costos asociados al tradicional reforzamiento con mallas de acero; dándole ductilidad y aumentando la tenacidad del hormigón.</li> <li>■ En hormigones pre-fabricados reforzados; en losas de pisos industriales (tráfico alto, medio y ligero) en losas y cimientos de hormigón para reemplazar el refuerzo secundario (malla de temperatura), en puentes, aeropuertos, fundaciones para equipos con vibración, reservorios, tanques etc.</li> </ul>	
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Incrementa la resistencia del hormigón al impacto, fatiga y a la fisuración.</li> <li>■ Incrementa la ductilidad y absorción de energía (resistencia a la tensión)</li> <li>■ Reducción de la fisuración por retracción.</li> <li>■ No afecta los tiempos de fraguado</li> <li>■ Su condición de encolada (pegada) asegura una distribución uniforme en el hormigón y shotcrete via húmeda.</li> <li>■ Relación longitud / diámetro igual a 65 para un máximo rendimiento.</li> <li>■ Extremos conformados para obtener máximo anclaje mecánico en el hormigón.</li> </ul>	
<b>Datos Básicos</b> Normas	SikaFiber CHO 65/35 NB cumple con las normas ASTM A820 "Steel Fibers for Reinforced Concrete" Tipo I y DIN 17140-D9 para acero de bajo contenido de carbono.	
<b>Presentación</b>	Fundas hidrosolubles de papel x 20 kg.	
<b>Almacenamiento</b>	Los sacos de SikaFiber CHO 65/35 NB pueden almacenarse por tiempo indefinido protegidos de la humedad.	
<b>Datos técnicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud</li> <li>• Diámetro de la fibra</li> <li>• Relación longitud/diámetro</li> <li>• Resistencia a tracción</li> <li>• Elongación de rotura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>35 mm. con extremos conformados</li> <li>0.54 mm</li> <li>65</li> <li>1200 Mpa min.</li> <li>4% max.</li> </ul>





# Construcción

<b>Consumo</b>	<p>Normalmente entre 20 y 50 kg de SikaFiber CHO 65/35 NB por m<sup>3</sup> de hormigón.</p> <p>Se recomienda realizar ensayos previos para determinar la cantidad exacta de fibra de acero a utilizar de acuerdo a los índices de tenacidad o energía absorbida especificada del hormigón.</p>
<b>Modo de empleo</b>	<p>SikaFiber CHO 65/35NB se puede agregar en la tolva de pesado de la dosificadora de hormigón, en la correa de alimentación, en camión mixer y mezcladora de hormigón como a continuación se indica en cada caso:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ En la tolva de pesado de la dosificadora, abra las fundas y vacíe las fibras directamente entre los áridos; no agregue las fundas sin abrir porque pueden bloquear las compuertas de descarga. Mezcle en forma normal, no se requiere tiempo extra de mezclado en este caso.</li> <li>■ En la correa de alimentación, si hay acceso, las fibras pueden adicionarse durante o después de agregar los áridos. Mezcle en forma normal, no se requiere tiempo extra de mezclado en este caso.</li> <li>■ En el camión mixer, una vez que todos los ingredientes se han incorporado, agregar las fibras mientras el mixer de hormigón está rotando a alta velocidad (12 rpm o más). Vaciar un máximo de 60 kg, de fibras por minuto. Una vez terminado el vaciado de las fibras, mezclar 5 minutos adicionales y chequear visualmente su distribución, mezclar 30 segundos adicionales si la distribución no es uniforme.</li> <li>■ En la mezcladora de hormigón, una vez que todos los ingredientes se han incorporado, agregar las fibras y mezclar por 30 segundos por cada pie cúbico a menos que se observe una distribución homogénea en menor tiempo.</li> </ul>
<b>Observaciones técnicas</b>	<p>No agregue SikaFiber CHO 65/35 NB al mezclador antes de los áridos. La fundas con papel hidrosolubles pueden agregarse directamente al hormigón.</p>
<b>Precauciones</b>	<p>Evite el contacto directo con los ojos y la piel. Protéjase utilizando guantes y anteojos de seguridad.</p> <p>La Hoja de Seguridad de este producto se encuentra a disposición del interesado en Internet ingresando en: <a href="http://www.sika.com.ec">www.sika.com.ec</a>.</p>
<b>Códigos R/S</b>	

La información y, en particular, las recomendaciones sobre la aplicación y uso final de los productos Sika son proporcionados de buena fe, basados en el conocimiento y experiencia actuales de Sika, respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados y manipulados, así como aplicados en condiciones normales de acuerdo a las recomendaciones de Sika. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra son tan particulares que de esta información, cualquier recomendación escrita o cualquier otro consejo no se puede deducir garantía alguna respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad en particular, así como responsabilidad alguna que surja de cualquier relación legal. El usuario del producto debe probar la conveniencia del mismo para un determinado propósito. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de sus productos. Se deben respetar los derechos de propiedad de terceros. Todas las órdenes de compra son aceptadas de acuerdo con nuestras actuales condiciones de venta y despacho. Los usuarios deben referirse siempre a la edición más reciente de la Hoja Técnica local, cuyas copias serán facilitadas a solicitud del cliente.



Sika Ecuatoriana S.A.  
www.sika.com.ec  
Guayaquil - km. 3 1/2 vía Durán - Tambo PBX 2612700 Fax 2601229  
Quito - Panamericana Norte km. 71/2 Telefax 2600419 - 2600420  
Cuenca - Av. de las Américas y 1<sup>a</sup> de Mayo Telefax 2556754



SikaFiber CHO 65/35 NB 2/2